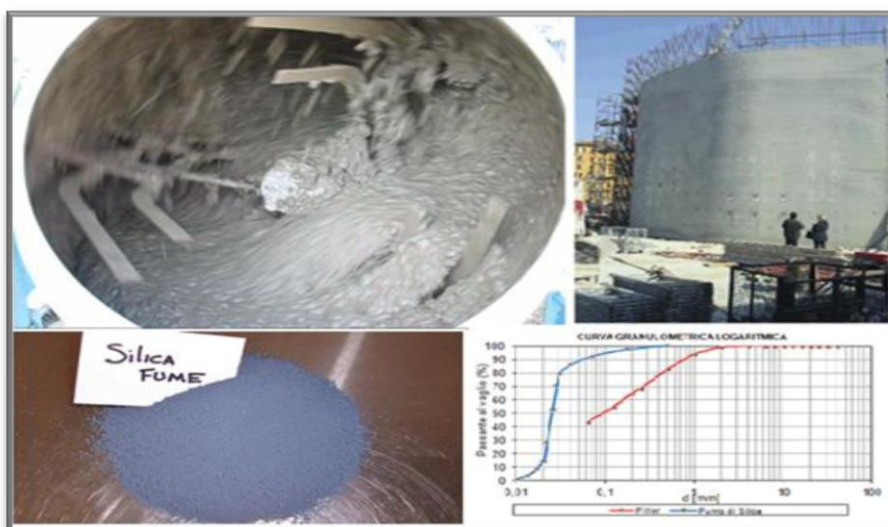




Università degli Studi di Napoli Federico II
Scuola Politecnica e delle Scienze di base

***CALCESTRUZZI AD ALTE PRESTAZIONI:
VALUTAZIONE SPERIMENTALE DELLE CARATTERISTICHE REOLOGICHE E
MECCANICHE DEI CALCESTRUZZI AUTOCOMPATTANTI CON FUMO DI SILICE***



TUTOR:

Prof.ssa Arch. Flavia Fascia
Prof. Ing. Renato Iovino

Coordinatore: Prof. Ing. Luciano Rosati

Dottorando:

Ing. Salvatore Simonetti

Dottorato in Ingegneria delle Costruzioni

Indirizzo: Recupero edilizio ed innovazione tecnologica

XXVII CICLO



Salvatore Simonetti

***CALCESTRUZZI AD ALTE PRESTAZIONI:
VALUTAZIONE SPERIMENTALE DELLE CARATTERISTICHE
REOLOGICHE E MECCANICHE DEI CALCESTRUZZI
AUTOCOMPATTANTI CON FUMO DI SILICE.***

Tesi di Dottorato
XXVII ciclo

Il Coordinatore
Prof. Ing. Luciano ROSATI

Ai miei genitori
Alfonso e Giovanna

Ringraziamenti

Al termine di questo lavoro ringrazio tutti coloro che hanno permesso la costruzione e il raggiungimento di questo mio nuovo obiettivo

Ringrazio di cuore il Prof Renato Iovino e la Prof. Flavia Fascia per tutta la competenza scientifica che mi hanno fornito e per la loro affettuosa ed umana disponibilità;

Ringrazio il Prof. Luciano Rosati, coordinatore del 27° ciclo del dottorato, per la piena disponibilità e professionalità che ha sempre mostrato in questi anni ;

Ringrazio la mia famiglia che, sempre pronta ad incitarmi , mi ha permesso questo nuovo traguardo, termine ultimo di un percorso di formazione non sempre facile e privo di ostacoli;

Ringrazio tutti gli amici, nonché colleghi del dipartimento, che si sono sempre resi disponibili per il superamento di qualsiasi ostacolo culturale ed organizzativo.

Indice:

CAPITOLO 1: Dal Calcestruzzo antico a quello moderno	pag. 1
CAPITOLO 2: Il Calcestruzzo Autocompattante SCC	13
• 2.1 Introduzione	13
• 2.2 Cenni Storici	14
• 2.3 Le ragioni dello sviluppo	16
• 2.4 Normative di Riferimento	17
• 2.5 Le proprietà del calcestruzzo autocompattante	19
• 2.6 I metodi per la determinazione delle proprietà del calcestruzzo auto compattante	21
- 2.6.1 Il cono di Abrams e la misura dello Slump-flow	22
- 2.6.2 L'imbuto a forma di V (V-funnel)	24
- 2.6.3 La scatola a L (L-box)	26
- 2.6.4 La scatola a U (U-box)	28
- 2.6.5 Anello Giapponese (Japanese Ring – J Ring)	29
• 2.7 La scelta del calcestruzzo autocompattante in relazione alle tipologie di strutture da realizzare	30
• 2.8 Reologia del calcestruzzo auto compattante	34
- 2.8.1 Il Cemento	36
- 2.8.2 Il rapporto acqua/cemento	36
- 2.8.3 Gli additivi ritardanti e superfluidificanti	37
- 2.8.4 Gli additivi modificatori della viscosità	37
• 2.9 Il proporzionamento del calcestruzzo autocompattante	38
• 2.10 La produzione del calcestruzzo autocompattante	42
• 2.11 La posa in opera del calcestruzzo autocompattante e le operazioni di finitura	43
- 2.11.1 La spinta sui casseri	43
- 2.11.2 Posa in opera: altezza di caduta, distanza laterale di scorrimento e vibrazione	45
- 2.11.3 Finitura delle superfici e maturazione dei getti	46
- 2.11.4 Facciavista delle strutture	46
• 2.12 La resistenza in opera del calcestruzzo autocompattante	47
• 2.13 Le proprietà del calcestruzzo autocompattante	49

- 2.13.1 Assestamento plastico	49
- 2.13.2 Ritiro plastico	49
- 2.13.3 Resistenza meccanica a compressione	50
- 2.13.4 Resistenza a trazione	50
- 2.13.5 Modulo Elastico	50
- 2.13.6 Aderenza acciaio-calcestruzzo	51
- 2.13.7 Durabilità	51
- 2.13.8 Ritiro Idraulico	52
• 2.14 Le prestazioni del SCC: Vantaggi e Svantaggi	53
• 2.15 Le prescrizioni di capitolato per il calcestruzzo autocompattante	54
• 2.16 Campi di impiego del SCC	55

CAPITOLO 3: Gli ingredienti del Calcestruzzo 59

• 3.1 Cemento	59
- 3.1.1. La Produzione del cemento Portland	61
- 3.1.2 I costituenti mineralogici del cemento Portland	61
- 3.1.2.1. L'idratazione dei silicati	61
- 3.1.2.2. L'idratazione degli alluminati	63
- 3.1.2.3. Il ruolo del gesso nella presa del cemento	64
- 3.1.2.4. Il ruolo della calce nel cemento	66
- 3.1.3 I cementi comuni e la norma UNI EN 197-1	68
- 3.1.3.1. Tipi di cemento	69
- 3.1.3.2. Le classi di resistenza del cemento	71
- 3.1.4 La scelta del cemento	72
• 3.2 L'Acqua	74
- 3.2.1. La qualità dell'acqua	
- 3.2.2. L'acqua d'impasto	75
• 3.3 L'aggregato	79
- 3.3.1. Proprietà degli aggregati che influenzano le caratteristiche reologiche del calcestruzzo allo stato fresco	80
- 3.3.1.1. La caratterizzazione granulometrica degli aggregati	80
- 3.3.2. Porosità, assorbimento e umidità degli aggregati	84

- 3.3.3. Proprietà degli aggregati che influenzano le caratteristiche elasto-meccaniche del calcestruzzo allo stato indurito	86
- 3.3.4. Proprietà degli aggregati che influenzano la durabilità delle strutture	
In calcestruzzo armato	88
- 3.3.4.1. Silice Alkali-Reattiva	89
- 3.3.4.2. Cloruro	90
- 3.3.4.3. Solfati e Solfuri	91
- 3.3.4.4. Gelività	92
• 3.4 Gli Additivi	93
- 3.4.1. Gli additivi resistenti all'acqua	94
- 3.4.2. Gli additivi ritentori d'acqua	95
- 3.4.3. Gli additivi ritardanti di presa	95
- 3.4.4. Gli additivi acceleranti di presa	96
- 3.4.5. Gli additivi acceleranti di indurimento	97
- 3.4.6. Gli additivi fluidificanti e superfluidificanti	97
- 3.4.6.1. Meccanismi di azione degli additivi fluidificanti/super fluidificati	100
- 3.4.6.2. Vantaggi degli additivi fluidificanti/superfluidificanti	102
- 3.4.7. Gli additivi Aeranti	103
• 3.5 Le aggiunte Pozzolaniche nel calcestruzzo	104
- 3.5.1. Loppa d'altoforno	104
- 3.5.2. Cenere Volante	105
- 3.5.3. Fumo di Silice	108

CAPITOLO 4: Sperimentazione	115
• 4.0. Premessa	115
• 4.1. Obiettivi	116
• 4.2. Piano della Sperimentazione	116
• 4.3. Scelta delle materie prime	119
• 4.4. Composizione del Mix Design	122
- 4.4.1 Mix Design SCC	123
- 4.4.2 Verifica Contenuto di Cloruri	132
• 4.5. Test su calcestruzzo autocompattante SCC allo stato fresco e confezionamento cubetti	139
• 4.6. Test su calcestruzzo autocompattante SCC allo stato indurito	144

- 4.6.1 Prova Monoassiale a Compressione (Distruttiva)	144
- 4.6.2 Prova di Trazione Indiretta “Brasiliana” (Distruttiva)	147
- 4.6.3 Prove sclerometriche ed ultrasoniche “Metodo SON-REB” (Non Distruttiva)	150
- - 4.6.3.1. Prova Ultrasonica	150
- - 4.6.3.2. Prova Sclerometrica	152
- - 4.6.3.3. Metodo SON-REB	153
- 4.6.4 Modulo Elastico Secante (Non Distruttiva)	155
- 4.6.5 Profondità di penetrazione dell’acqua sotto pressione (Non Distruttiva)	157
• 4.7. Analisi dei Risultati	159
- 4.7.1. Analisi proprietà reologiche dell’autocompattante SCC	159
- - 4.7.1.1. Slump-flow	159
- - 4.7.1.2. V-Funnel	162
- - 4.7.1.3. L - Box	164
- - 4.7.1.4. U - Box	165
- - 4.7.1.5. J - Ring	166
- - 4.7.1.6. Aria Inglobata	168
- - 4.7.1.7. Massa Volumica	169
- - 4.7.1.8. pH	170
- - 4.7.1.9. Osservazioni proprietà reologiche calcestruzzo autocompattante SCC	172
- 4.7.2. Analisi proprietà meccaniche dell’autocompattante SCC	172
- - 4.7.2.1. Resistenza meccanica a Compressione (Distruttiva)	172
- - 4.7.2.2. Resistenza meccanica a Compressione Metodo SON-REB (Non Distruttiva)	180
- - 4.7.2.3. Confronti $R_{cls_{rottura}}$ con $R_{cls_{Sonreb}}$	190
- - 4.7.2.4. Resistenza a Trazione Indiretta “Brasiliana (Distruttiva)	194
- - 4.7.2.5. Modulo di Elasticità Secante	202
- - 4.7.2.6. Modulo di Elasticità Dinamico	223
- - 4.7.2.7. Modulo di Elasticità Secante NTC 08	228
- - 4.7.2.8. Confronto: Modulo di Elasticità Dinamico, Modulo di Elasticità secante UNI 12390-13, Modulo di Elasticità secante NTC 08.	230
- - 4.7.2.9. Profondità di penetrazione all’acqua sotto pressione	231
- - - 4.7.2.9.1 Test permeabilità all’acqua calcestruzzo ordinario	233
- - 4.7.2.10. Osservazione proprietà meccaniche calcestruzzo autocompattante SCC	234

• 4.8. Conclusioni	236
- 4.8.1. Effetti del fumo di silice sulle proprietà reologiche dell'autocompattante	237
- 4.8.2. Effetti del fumo di silice sulle proprietà meccaniche dell'autocompattante	237
- 4.8.3. Analisi dei Costi tipologie mix	239
- 4.8.3. Sviluppi futuri	240
• Bibliografia	241

1. DAL CALCESTRUZZO ANTICO A QUELLO MODERNO

Il termine calcestruzzo dal punto di vista etimologico deriva dal latino *calcis-structio* cioè una struttura a base di calce. In realtà il termine utilizzato da Vitruvio per definire un conglomerato molo simile al calcestruzzo è l'*opus caementicium*, formato da pietra o rottami di mattone mescolati con calce sabbia ed acqua. Per le opere idrauliche, o esposte all'azione delle acque piovane, la sabbia era sostituita in parte da pozzolana (*pulvis puteolana*) o da coccio pesto; il rottame di pietra usato per confezionare il calcestruzzo era “non più grosso di una mano” e chiamato *caementum*, dal latino *caedo* “tagliare pezzi”. La scelta dei materiali, la composizione e le modalità di messa in opera del calcestruzzo utilizzato all'epoca dall'impero Romano vengono dettagliatamente riportate da Vitruvio nei suoi 10 libri *De Architectura*. Al di là degli aspetti etimologici la principale differenza tra il calcestruzzo antico e moderno sta nel tipo di legante: i Romani utilizzavano calce e pozzolana o calce ed impurità a base di silice ed allumina che conferivano alla miscela proprietà idrauliche, mentre nel calcestruzzo moderno il legante è il cemento, sia esso Portland o di altro genere. Altra importantissima differenza sta nella specie di inerte e nella sua distribuzione granulometrica (figura 1.3).

Prima dell'avvento del calcestruzzo la realizzazione di grandi costruzioni poteva durare secoli a causa della difficoltà e della lentezza nel movimentare le grandi pietre che si utilizzavano. Per avere l'ordine di grandezza dei tempi di cantiere prima e dopo il calcestruzzo basta ricordare che per la costruzione in *saxum quadratum*, tra l'altro incompiuta, del tempio di Apollo a Didima accorsero 462 anni (dal 332 a.C. al 130 d.C. circa), mentre per costruire in *opus caementicium* il Pantheon si impiegarono solo sette anni (dal 118 d.C. al 125 d.C.). La tecnica era semplice si procedeva alla costruzione di due paramenti murari che fungevano da casseri e si colava all'interno il calcestruzzo (fig. 1.1). Tuttavia, tale rapidità di



Figura 1.1: Muro in calcestruzzo romano che mostra tra i paramenti in mattone il conglomerato a base di malta e grossi rottami di pietra o mattone (Pompei).

esecuzione fu soprattutto dovuta all'uso della pozzolana che mescolatosi con calce conferiva al conglomerato un accelerato indurimento. La scoperta della pozzolana segnò un rivoluzionario progresso nelle antiche costruzioni in calcestruzzo grazie alla capacità della miscela calce-pozzolana, non solo di indurire in assenza della CO_2 , ma anche con velocità molto maggiore di quella richiesta dal processo di carbonatazione della calce. Oggi sappiamo che la pozzolana è un materiale di natura inorganica, prevalentemente costituito da silice SiO_2 e da allumina Al_2O_3 mal cristallizzate o completamente amorfe. Essa è in grado di provocare l'indurimento della calce e di rendere il conglomerato indurito resistente all'azione dell'acqua grazie alla formazione di silicati di calcio idrati (C-S-H) e alluminati di calcio idrati (C-A-H) per reazione della calce con la silice e l'allumina della pozzolana. Infatti, la calce non avendo proprietà idrauliche, si idrata solo a contatto con l'anidride carbonica che permea con difficoltà attraverso i giunti dei paramenti-casseforme; questo processo d'indurimento, fortemente legato al grado di penetrazione dell'aria, risultava più scadente quanto più compatta ed impermeabile era la barriera offerta dai paramenti in pietra o in mattoni. (Reazione 1) .E' appena il caso di precisare che mentre nei mediocri calcestruzzi a base di calce (R compressione dai 2 ai 4 N/mm^2) l'indurimento è dovuto solo alla reazione di carbonatazione, in quelli arricchiti con pozzolana (R compressione dai 10 ai 20 N/mm^2) la carbonatazione stessa non è esclusa e dunque l'idratazione della calce avviene con entrambe le relazioni espresse in precedenza.

Le doti idrauliche della sabbia vulcanica di Cuma, ovvero della pozzolana, erano ben note a Vitruvio che nel libro quinto al capo XII del *De Architectura*, in riferimento alla alle costruzioni dei porti scrive:

“La struttura del molo destinata a rimanere sott'acqua deve essere fabbricata con polvere pozzolana importata da quella regione che si estende da Cuma fino al promontorio di Minerva, mescolata con calce nel rapporto di due a uno .Quindi occorrerà calare in acqua, nella zona prestabilita, dei cassoni senza fondo che verranno saldamente serrati con pali di quercia e ancorati per mezzo di catene, poi si procederà a livellare e a ripulire la parte di fondale tra loro compresa, provvedendo a fare una gettata di malta e

calcestruzzo com'è s'è detto sopra, fino a che la struttura muraria non avrà completamente riempito il vuoto dei cassoni”.

In riferimento alla sabbia, inoltre, Vitruvio nel libro secondo al capo IV del suo trattato, scrive: *“Nelle costruzioni in calcestruzzo bisogna in primo luogo trovare la sabbia adatta non mista a terra, per impastare la malta. Le varietà di sabbia da cava sono: nera, bianca, rossa e rossa scura. Ottima è quella che sfregata tra le dita produce un leggero crepitio. Quella mischiata a terra, invece, non presenta caratteristiche di ruvidezza. Altrettanto buona di qualità si rivela quella che gettata su un lenzuolo bianco non lascerà tracce di terra né di sporco dopo essere stata scossa via. In assenza di cave si potrà ricavare la sabbia dai fiumi, dalla ghiaia o anche dalla rena del mare. Questo tipo presenta però degli inconvenienti nelle costruzioni: fa fatica ad asciugarsi e di conseguenza per non appesantire la struttura muraria occorre ad intervalli farla riposare(..)”*

Gli operai che sceglievano le materie prime per produrre la calce erano chiamati *calci cocitore*; essi non sceglievano una pietra di calcare puro ma una con un elevato contenuto di CaO, andando verso un'elevata grassezza della calce. Per non lasciare dubbi sui materiali di base da impiegare, Vitruvio suggeriva nel libro settimo del *De Architectura* al capo II indicazioni sulla qualità della calce: *“A macerazione ultimata e dopo aver tutto scrupolosamente predisposto per la messa in opera, si prenda una cazzuola e allo stesso modo con cui si taglia il legname con l'ascia, si tagli con quella della calce. Se si troveranno dei grumi vorrà dire che la calce non è pronta; se la cazzuola uscirà asciutta e pulita vorrà dire che la calce è fiacca e arida, mentre per essere grassa e ben macerata dovrà restare attaccata come colla al ferro della cazzuola”.*

Dall'opera di Vitruvio è possibile anche desumere quali dovevano essere i rapporti delle sabbie con la calce suggeriti per formare le malte da utilizzare per unire i mattoni nelle murature, per gli intonaci, per la formazione del calcestruzzo da aggiungere ai *caementi*, cioè ai frantumi di pietre, marmi, tufo e mattoni (libro secondo, capo V): *“ la calce ... una volta raffreddata la si mescola con sabbia nel rapporto di uno a tre se questa è di cava, di uno a due se invece è di fiume; così si ottiene un dosaggio ben equilibrato. Ma il risultato*

sarà ancora migliore se alla sabbia di fiume o di mare si aggiungerà la terza parte di frammenti di coccio pestato e setacciato”.Le proporzioni d’impasto possono essere sintetizzate come segue nella tabella 1.1:

Tabella 1.1

Resistenza	Legante	INERTE fino	INERTE grosso
<div>resistenza</div>	1 parte di calce	3 parti di sabbia di cava	--
	1 parte di calce	1 parti di sabbia di cava + 2 parti di sabbia di fiume	--
	1 parte di calce	2 parti di sabbia di fiume	1 parte di mattone frantumato e vagliato (dimensione massima contenibile in una mano)
	1 parte di calce + 2 parti di pozzolana	2 parti di sabbia di fiume	1 parte di mattone frantumato e vagliato (dimensione massima contenibile in una mano)

Nel calcestruzzo antico erano impiegati, dunque miscele di inerti a base di sabbia (0-5mm) e rottami di pietra o mattoni (30-50mm) (fig1.2), risultando praticamente assenti le frazioni intermedie, contrariamente a quanto accade per il calcestruzzo moderno (fig. 1.3).

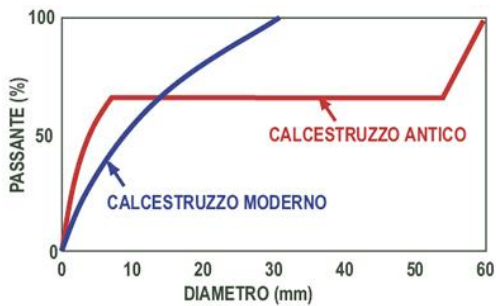


Figura 1.3: Distribuzione granulometrica discontinua nell’aggregato del calcestruzzo antico (con diametro massimo di 60mm) e continua in quello del calcestruzzo moderno (con diametro massimo di 30mm).



Figura 1.2: Tipiche granulometrie degli aggregati del calcestruzzo romano: miscela di grossi rottami di pietra e/o mattoni con sabbia; assenza di materiale lapideo con dimensione intermedia.

Per il buon risultato dell’opera si faceva affidamento sulla battitura, o costipamento, sia per le malte da intonaco che per i calcestruzzi e le avvertenze di Vitruvio a questo riguardo erano confermate anche da Plinio che, per i calcestruzzi impiegati per la costruzione delle cisterne, raccomandava che le fondamenta ed i fianchi fossero ben battuti con mazze di ferro. Le tecniche costruttive romane anticipano, inoltre, l’idea del materiale cemento armato dei nostri giorni, allorquando introducono rinforzi di legno o di metallo, all’interno dei possenti getti del loro calcestruzzo. Vitruvio, a tal proposito, quando parla de “La disposizione dei bagni” (nel libro quinto,

capo X del De Architectura) descrive il modo di realizzare finte volte in metallo e malta: “*Si appendano alle travi per mezzo di uncini delle asticelle di ferro ad arco il più fitte possibili così da potervi far poggiare delle tegole senz’orlo; si otterranno delle volte poggianti interamente su di una struttura in ferro. Le commettiture superiori delle volte saranno cosparse e levigate ad argilla mista a pelo, mentre la parte inferiore, che guarda verso il pavimento, deve essere prima rinforzata con coccio pesto e calce, quindi intonacata e levigata*”.

Con la caduta dell’impero Romano si ebbe un declino della qualità delle costruzioni in calcestruzzo, causato non tanto dalla perdita della cultura degli impasti quanto dalla mancata osservanza delle regole Vitruviane. Le fornaci per la produzione calce, un tempo molto curate nei dettagli costruttivi, furono sostituite da forni di campagna, si perse la capacità di scegliere con attenzione le materie di base, si usò con frequenza crescente sabbia sporca ed argillosa, si abbandonò l’uso della pozzolana e del coccio pesto, si confezionarono sempre più spesso impasti con elevato contenuto d’acqua , messi in opera senza pistonatura.

Tabella 1.2: Confronto delle prestazioni e della composizione tra calcestruzzo antico e quello moderno.

	CALCESTRUZZO ANTICO	CALCESTRUZZO MODERNO
Legante	calce; calce + pozzolana; calce idraulica;	cemento Portland; cemento pozzolanico; cemento d’altoforno;
Aggregati (inerti)	sabbia e rottami grossi di pietre naturali o mattoni;	sabbia e ghiaia o pietrisco con distribuzione granulometrica continua;
Additivi	prodotti naturali (zucchero, ecc) di non ben definita funzione;	prodotti chimici: fluidificanti, superfluidificanti, aeranti, acceleranti, ritardanti, ecc;
Composizione	suggeriti rapporti tra sabbie, calce, pozzolana e rottami di pietra;	importanza del rapporto acqua/cemento;
Miscelazione	manuale;	con mezzi meccanici (betoniere);
Trasporto	solo a breve distanza;	anche a lunga distanza con autobetoniere e pompe;
Casserature	in legno o con paramenti in mattoni o pietre;	metalliche, di legno, di plastica;
Compattazione	rudimentale con mazze di ferro;	molto efficace, con mezzi meccanici (vibratori ad ago o a parete)
Stagionatura	non precisata;	protezione del getto con teli, nebulizzatori di acqua, pellicole anti-evaporanti;
Indurimento	discreto (fino a 10-15 Mpa)	ottimo ben oltre i 30 MPa

Il risveglio umanistico portò alla riscoperta dei trattati di Vitruvio che, nel 1511, furono tradotti in italiano da Giovanni Monsignori, noto come fra' Giocondo, e pubblicati in una versione illustrata. A questa ne seguirono tante altre, specialmente in Francia dove nel '700 iniziarono delle sperimentazioni sui leganti utilizzati per confezionare i calcestruzzi "Romani". Nel 1750 circa, ad opera dell'inglese John Smeaton, si ebbe la rivoluzionaria scoperta della calce idraulica che permise di abbandonare l'uso di misure a base di calce e pozzolana. Le sperimentazioni sulla cottura di calcari ed impasti a base di calce idraulica portarono, in pochi anni, all'invenzione del cemento Portland, segnando definitivamente la fine del calcestruzzo antico e la nascita di quello moderno. La Tabella 1.2 riassume tutte le differenze nelle prestazioni e nella composizione di un calcestruzzo antico e di quelle di un calcestruzzo moderno derivanti principalmente dall'impiego di un diverso legante e di una diversa granulometrica degli aggregati. Una importante differenza tra i due tipi di calcestruzzo (non mostrata in Tabella 1.2) riguarda la durabilità delle strutture paradossalmente migliore in quelle con calcestruzzo romano per l'assenza dei ferri di armatura presenti nelle strutture in c.a. ed esposte a rischio di corrosione. La fabbricazione del "cemento", inteso come legante idraulico artificiale, inizia verso la metà del XVIII secolo. Nel 1796 l'inglese J.Parker, dalla cottura di speciali calcari trovati nei dintorni di Londra, ricavò un prodotto cementizio che chiamò *cemento romano* e la cui principale caratteristica era la rapidità di presa. La fabbricazione di tale cemento avvenne, per alcuni in Inghilterra, in proporzioni modestissime ed in forma empirica. L'era moderna dei cementi idraulici ha inizio ufficialmente il 21 ottobre 1824 quando l'inglese Joseph Aspdin, fornaciario muratore, nato a Leeds, conseguì un brevetto per il processo di preparazione di un prodotto che, ottenuto con la cottura di un'intima mescolanza di calcare e di sostanze argillose, ridotte in polveri finissime ed impastata con acqua, dopo un breve periodo diventava una massa dura, in tutto simile alla pietra da costruzione che abbonda nell'isola di Portland. Da ciò il nome di cemento Portland con il quale Aspdin chiamò il suo ritrovato. Si trattava, però, ancora di una fabbricazione del tutto empirica. Il grande sviluppo industriale si ebbe più tardi, dopo le scoperte di Isaac, Charles e Johnson (1844) che misero in evidenza l'enorme importanza della *cottura fino alla clinkerizzazione*, e

dopo gli studi di Le Chatelier e Michaelis che permisero di fissare la composizione chimica del cemento Portland in modo da poterlo fabbricare artificialmente ovunque, utilizzando e dosando materie prime di diversa origine. Lo stesso Michaelis propose l'aggiunta di pozzolana al cemento Portland affinché, combinandosi con la calce di idrolisi, migliorasse l'idraulicità e l'impermeabilità; con tale intuizione si deve il successivo sviluppo della produzione di cemento pozzolanico con pozzolana naturale o l'impiego di pozzolana artificiale (loppa, cenere volante, fumo di silice) come materiale sia comacinato con il clinker sia aggiunto successivamente al cemento. A seguito dello sviluppo della produzione dei cementi, ritornò ad affermarsi ad a progredire la tecnica della costruzione con getti in calcestruzzo che, nei secoli addietro, era stata sostituita dalla costruzioni in pietre e mattoni.

Negli stessi anni in cui assiste al progresso nella produzione del cemento Portland, compaiono anche le prime pubblicazioni relative all'importanza dell'utilizzo di inerti con granulometria assortita al fine di minimizzare il volume di matrice cementizia necessaria al loro riempimento. Il raggiungimento di questo obiettivo ha come effetto sia la riduzione del costo del calcestruzzo (grazie alla riduzione del componente più costoso, il cemento) sia la limitazione degli inconvenienti tecnici legati ad un eccesso di cemento (deformazione viscosa, fessurazioni da ritiro o per gradienti termici). E così si arriva alla formulazione di equazioni che descrivono la combinazione ottimale degli inerti per minimizzare i vuoti tra aggregati, tra quelle ancor oggi utilizzate si può ricordare l'equazione di *Fuller o Bolomey*.

Agli inizi del 900' il calcestruzzo era confezionato secondo regole dettate dall'esperienza (tabella 1.3). Non era stato sviluppato ancora un modello previsionale basato su risultati sperimentali (mix design). Le carenze prestazionali dei conglomerati erano, in un certo senso, mascherate da coefficienti di sicurezza elevati (nel 1907, in Italia, pari a 5).

Tabella 1.3 Misure consigliate da C.Pesenti

Cemento (kg)	Sabbia (lt.)	Ghiaia (lt.)	Acqua (lt.)	Tipologia	σ_b (kg/cm ²)
400	370	740	210	impermeabile	400
350	390	780	200	impermeabile	300
300	410	820	195	impermeabile	200
250	430	870	185	impermeabile	180
200	450	900	180	permeabile	150
150	455	910	175	permeabile	100

Non è possibile confrontare il calcestruzzo di un secolo fa con quello correntemente impiegato oggi conoscendone solo la resistenza caratteristica, né è semplice se è nota la dosatura degli impasti. In tal senso, un primo problema che si riscontra è la mancanza di indicazione sul titolo del cemento usato all’inizio del 900’.

Tabella 1.4 Evoluzione negli anni del rapporto a/c.

Periodo	Dosaggio di cemento (kg/m ³)	Acqua d’impasto (kg/m ³)	Rapporto a/c	Resistenza media a compressione (Mpa)
1945-1950	340	170	0,50	30
1950-1960	300	170	0,57	30
1960-1980	270	170	0,63	30

Poco o nulla può essere detto con certezza relativamente alla finezza di macinazione, al livello di impurità presenti nel cemento, al grado di compattazione raggiunto in fase di getto. A tutto ciò va aggiunto che l’industria dei cementi ha progressivamente migliorato la qualità del legante, producendo miscele che hanno consentito la graduale riduzione dell’acqua di impasto a parità di prestazioni meccaniche. Tale pratica è stata concepita al contrario dai costruttori che, nella ricerca di maggiori profitti, a parità di acqua hanno ridotto il dosaggio di cemento (tabella 1.4), vanificando la possibilità di produrre calcestruzzi più durevoli di quelli del passato.

Le difficoltà di realizzazione di strutture durevoli nel tempo

Ormai da tempo, in Italia e nel mondo, numerosi convegni, congressi e seminari, si sono occupati principalmente della durabilità delle strutture in conglomerato cementizio armato e precompresso.

Per realizzare una struttura funzionale e resistente nel tempo, è di fondamentale importanza l'utilizzo di un calcestruzzo durevole confezionato dal produttore in base alle prescrizioni dettate dalle normative. A volte però si concretizzano situazioni in cui le operazioni di posa in opera, compattazione e stagionatura, non abbastanza curate, provocano numerosi difetti: ad esempio vespai e nidi di ghiaia, frequenti nelle strutture verticali (pile, pilastri, muri di sostegno) e in quelle sub-orizzontali (rampe d'accesso, scale, tetti a falde); soluzioni di continuità in corrispondenza delle riprese di getto di strutture estese in cui non si può eseguire la messa in opera con un getto unico; infine, per una carente protezione umida della struttura, formazione di cavillature sulla superficie del conglomerato, che facilitano l'azione degradante delle sostanze aggressive presenti nell'ambiente.

Ormai da anni si verifica una contraddizione sulla durabilità delle opere in conglomerato cementizio. Mentre da un lato, con la definizione dei livelli di aggressione ambientale e i relativi provvedimenti in termini di acqua/cemento massimo, dosaggio di cemento e copriferro minimi da adottare, si è verificato un potenziale aumento della durabilità delle opere in calcestruzzo, di fatto il settore edile è stato caratterizzato da un aumento del degrado strutturale dovuto a una cattiva esecuzione del calcestruzzo, con un aumento dei difetti della struttura in opera e una diminuzione del suo grado di durabilità.

Le cause di questo degrado sono imputabili ad un generale decadimento della qualità della manodopera presente in cantiere e ad un basso livello di meccanizzazione dei cantieri edili relativamente ad alcune operazioni: i lavori di betonaggio, messa in opera e compattazione, ancora molto faticosi, hanno favorito così lo spostamento dei lavoratori più esperti e di quelli più anziani, verso attività fisicamente meno impegnative. Il primo passo per garantire una durabilità della struttura potrebbe essere un intenso programma di formazione per migliorare la qualità della manodopera disponibile sul cantiere. Rimarrebbero comunque le difficoltà legate alle carenze strutturali del settore e al livello di

meccanizzazione esistente, e la presenza di manodopera qualificata non eliminerebbe comunque i problemi riguardanti l'impossibilità di realizzare il getto nelle strutture sottili e armate, dove non sarebbe possibile l'utilizzo di vibratori.

Per ottenere una struttura in calcestruzzo durevole, occorre rendere la qualità del conglomerato il più possibile indipendente dalle condizioni esistenti in cantiere, dalla qualità della manodopera e dai sistemi di getto e di compattazione disponibili. Questo sarà possibile utilizzando un conglomerato che, una volta scaricato dall'autobetoniera, sia in grado di sopperire a possibili carenze ed errori provocati in fase di messa in opera e compattazione.

Dall'oriente un prodotto all'avanguardia

Il settore della tecnologia del calcestruzzo ha indirizzato le proprie ricerche sulla formulazione di calcestruzzi innovativi che soddisfino le esigenze di durabilità dei materiali e componenti edilizi.

Il risultato della ricerca tecnologica giapponese ha portato alla creazione di una particolare tipologia di conglomerati definiti *calcestruzzi autocompattanti* (**self-compacting-concrete**) che saranno in grado di migliorare in futuro il processo di industrializzazione del settore delle costruzioni.

Si tratta di un calcestruzzo dalle particolari caratteristiche reologiche, fisiche ed elastomeccaniche, dotato di elevata stabilità e ridotta tendenza alla segregazione anche in presenza di operazioni di posa eseguite non correttamente. Il nuovo conglomerato, riempiendo completamente i casseri ed eliminando macrovuoti e aria in eccesso indipendentemente dall'efficacia con cui viene compattato, porta all'eliminazione di macrodifetti e macrobolle responsabili della diminuzione delle prestazioni meccaniche e del grado di durabilità della struttura.

La principale proprietà di questo calcestruzzo è l'autocompattabilità, che consiste nella capacità di essere gettato all'interno di una cassaforma di cui occuperà gli angoli più remoti e di difficile accesso, senza richiedere forze esterne come la vibrazione o la compattazione, ma facendo affidamento esclusivamente alla forza del peso proprio.

Oltre all'elevata fluidità, che permette la messa in opera senza richiedere alcuno sforzo di compattazione, il calcestruzzo autocompattante deve possedere un basso rapporto acqua-cemento grazie alla presenza di additivi superfluidificanti, e deve avere un'elevata resistenza alla segregazione. Deve cioè essere in grado di conservare uniforme distribuzione degli ingredienti che lo compongono (cemento, aggiunte, aggregati, additivi e acqua) nelle diverse fasi: durante la posa in opera, quando fluisce nello stampo ed entra in contatto con le armature e le pareti del cassero, e dopo il riempimento del cassero, evitando la sedimentazione degli aggregati grossi sul fondo e di conseguenza la risalita di acqua in superficie (definita bleeding).

2. IL CALCESTRUZZO AUTOCOMPATTANTE SCC

2.1 Introduzione

I calcestruzzi autocompattanti definiti come “SCC” (*Self-Compacting-Concrete*) rappresentano una categoria di conglomerati che non necessita, durante la posa in opera, di alcuna forma di compattazione o vibrazione in quanto sono in grado di riempire completamente la cassaforma, consentendo nel contempo una efficace espulsione dell'aria intrappolata in eccesso rispetto a quella fisiologica e, quindi, capaci di garantire valori della resistenza in opera sostanzialmente coincidenti con quelli conseguibili sui provini prelevati a “bocca di betoniera” e compattati a “rifiuto”. Da questo punto di vista, quindi, i



calcestruzzi autocompattanti possono ritenersi una naturale evoluzione di quelli superfluidi (classe di consistenza S5) e sono stati sviluppati per esasperare la possibilità di rendere la qualità del conglomerato in opera sostanzialmente indipendente dalle operazioni di posa e compattazione oltre che per accelerare le operazioni di betonaggio per la realizzazione di strutture in cui siano rilevanti i volumi di calcestruzzo impiegati.

Al confronto con i calcestruzzi ordinari i **principali vantaggi** del calcestruzzo autocompattante possono essere così sintetizzati:

- *minor tempo di posa in opera e tempi di costruzione ridotti;*
- *riduzione della manodopera per le operazioni di compattazione;*
- *assenza di vibrazioni;*
- *posa in opera semplificata;*
- *riduzione dei livelli di rumore in cantiere per assenza delle operazioni di costipamento;*

- *ambiente di lavoro più sano;*
- *completo ed omogeneo riempimento dei casseri anche nel caso di strutture fittamente armate (no blocking), casseforme complesse, sezioni ristrette e ostacoli in generale;*
- *maggior durabilità;*
- *assenza di difetti (segregazione e nidi di ghiaia) legati alla non adeguata compattazione;*
- *miglior finitura superficiale e resa estetica (assenza di pori e difetti superficiali in genere);*
- *maggior libertà di progettazione;*
- *possibilità di realizzare sezioni trasversali ridotte e strutture più snelle.*

Per contro, gli **aspetti critici** legati all'uso dell'SCC rispetto al calcestruzzo ordinario riguardano:

- *il tendenziale maggior costo dell'SCC rispetto a calcestruzzi ordinari di pari resistenza;*
- *le maggiori spinte esercitate dagli SCC sui casseri e le conseguenti maggiori spese per la loro realizzazione (calibrazione delle velocità e delle altezze di getto);*
- *l'assenza di modelli validati per un'adeguata previsione di queste spinte;*
- *l'assenza di modelli pienamente validati per la previsione dei valori del modulo elastico e dei fenomeni lenti (creep e ritiro);*
- *la maggior attenzione richiesta nella selezione dei materiali;*
- *la maggior cura necessaria nel proporzionamento e progetto delle miscele (mix design);*
- *i più alti livelli di conoscenza, organizzazione ed esperienza necessari sia negli impianti di produzione che in cantiere;*
- *la tendenza a manifestare maggiore ritiro plastico.*

2.2 Cenni storici

Alcuni tipi di miscele che possono essere considerati i precursori del calcestruzzo autocompattante (SCC) sono conosciuti da tempo. Oltre 70 anni fa, infatti, negli USA, si mettevano in opera calcestruzzi molto fluidi denominati: "calcestruzzi colati". Essi

avevano delle buone caratteristiche autocompattanti e autolivellanti. La loro buona fluidità, tuttavia, andava a scapito della durezza in quanto questi calcestruzzi potevano essere confezionati solo con rapporti A/C molto elevati. I calcestruzzi che oggi sono classificati come SCC, comunemente attribuiti all'invenzione del professore Okamura, sono stati impiegati, con la denominazione "Self Compacting" a partire dal 1988 in Giappone e Canada. Solo nel 1990 però sono stati eseguiti i primi grandi progetti in Giappone. L'introduzione in Europa (Francia, Svezia) è ancora più recente e risale al 1996.

Un prototipo di SCC fu sperimentato per la prima volta nel 1988 e realizzato utilizzando materiali facilmente reperibili sul mercato. Ebbe la denominazione di "High Performance Concrete", quasi nello stesso periodo però questo nome fu dato, da Altcin e altri, ad un tipo di calcestruzzo a basso rapporto A/C ed elevata durabilità. Il nome del calcestruzzo di cui trattiamo fu allora cambiato in quello odierno di "Self Compacting Concrete".

Un primo documento sul calcestruzzo autocompattante fu presentato da Ozawa all'EASEC-2, la seconda East-Asia and Pacific Conference in Structural Engineering and Construction, nel Gennaio 1989. Successivamente, sempre per merito del prof. Ozawa, ci fu la presentazione dell'SCC al CAMMET & ACI International Conference di Instambul nel Maggio del 1992; seguì l'ACI workshop nel Novembre del 1994 a Bangkok, sponsorizzato dal prof. Zia, attraverso il quale l'SCC diventò conosciuto fra i ricercatori e gli ingegneri di tutto il mondo interessati alla durabilità del calcestruzzo ed alla razionalizzazione delle metodologie di costruzione.

Nel Novembre del 1996 il prof. Realizza il Ferguson Lecture at ACI Fall Convention a New Orleans, che diffonde la conoscenza dell'SCC fra i ricercatori in America; nel Gennaio 1997 viene fondato il comitato del RILEM che tratta di calcestruzzo autocompattante; nell'Agosto del 1998, a Kochi, in Giappone, si realizza il primo workshop dedicato al Self-Compacting Concrete e per finire, nel Settembre del 1999, il First International RILEM Symposium di Stoccolma, getta le basi per una collaborazione ed un confronto a livello mondiale su questo tema così importante.

Un gruppo di studio su scala internazionale è attualmente attivo nella ricerca e nella standardizzazione di test legati all'SCC atti a stabilire e misurare, nella fase di miscelazione e di getto, le caratteristiche di auto compattazione.

2.3 Le ragioni dello sviluppo

Il calcestruzzo autocompattante è ormai considerato da tutti gli esperti mondiali il calcestruzzo del futuro. Committenze, progettisti e imprese possono guardare avanti con rinnovata fiducia alle loro opere nel rispetto delle esigenze di qualità, design architettonico e costi di costruzione.

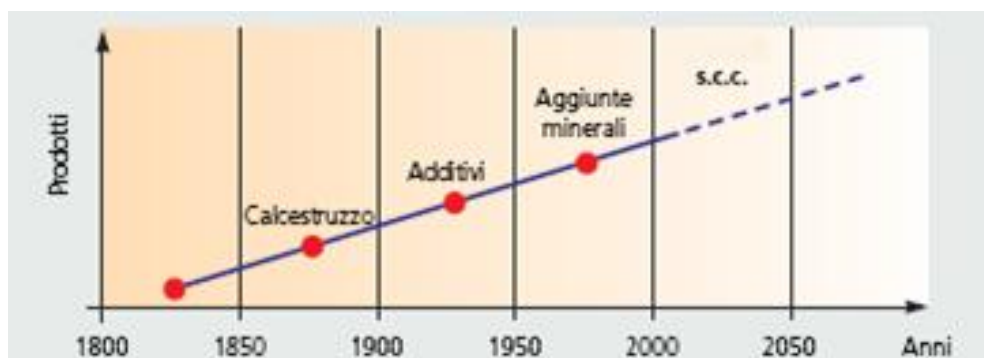


Fig. 2.1 Lo sviluppo dei prodotti nel corso degli anni

Le nuove tecniche costruttive e l'attenzione dei committenti al "costo globale" delle opere, che include anche i costi di manutenzione nel periodo di vita in servizio, richiedono una sempre maggiore attenzione alla durabilità delle strutture.

La mancanza sempre più sentita di personale qualificato e ben preparato al getto ed alla costipazione del calcestruzzo porta l'impresa ad affrontare una serie di problematiche che incidono sia sui costi di esecuzione dei lavori sia nella qualità dell'opera.



Fig. 2.2 Le ragioni dello sviluppo

L'obiettivo primario per il futuro delle costruzioni rimane, pertanto, il miglioramento della produttività: il calcestruzzo autocompattante, contribuisce in modo sostanziale al raggiungimento di questo risultato riducendo drasticamente i costi di produzione.

2.4 Normative di riferimento

La normativa di riferimento per l'autocompattante, è la **UNI 11040: 2003**, complementare alla UNI 206-1, e riguarda la definizione, i materiali, la formulazione, la produzione e il controllo della qualità del calcestruzzo SCC.

La UNI 11040 elenca precisi termini e definizioni sul calcestruzzo SCC tra cui la capacità di riempimento, la capacità di passare attraverso gli ostacoli, la resistenza alla segregazione, ecc. Il calcestruzzo autocompattante SCC viene definito dalla stessa norma come un: *"calcestruzzo omogeneo che viene messo in opera e compattato senza intervento di mezzi esterni (vibrazione) ma per effetto della sola forza gravitazionale. Il calcestruzzo autocompattante, oltre a soddisfare i requisiti di classe di resistenza e di esposizione definiti nella UNI EN 206-1, ha la specifica proprietà, allo stato fresco, di un'elevata fluidità con assenza di segregazione"*.

Tra le definizioni, si evidenziano quelle di:

1. "tempo di spandimento", tempo necessario a raggiungere il diametro di 500 mm dopo l'efflusso dall'imbuto;
2. "tempo di lavorabilità", tempo necessario per ridurre la consistenza del calcestruzzo fresco dal valore iniziale a 600 mm;

3. "finissimo", materiale minerale (somma di cemento, filler, aggiunte, finissimi dell'aggregato) passante allo staccio da 0,125 mm.

In riferimento alle *aggiunte minerali*, la norma evidenzia l’uso di due tipi di aggiunte:

- 1. tipo I: filler conformi alla EN 12620, pigmenti conformi alla UNI EN 12878;
- 2. tipo II: ceneri volanti conformi alla UNI EN 450, **fumi di silice** conformi alla prEN 13263-1;

sottolineando l’importanza che ogni fornitura di filler sia corredata di documentazione circa la finezza in termini di superficie specifica di Blaine.

Per quel che riguarda l’*aggiunta di additivi*, in particolare i *modificatori della viscosità*, deve essere garantita la compatibilità con gli impasti cementizi nei riguardi dello sviluppo della resistenza e della durabilità.

I requisiti prestazionali degli autocompattanti allo stato fresco sono regolati dalle norme

Caratteristica	Intervallo di accettazione	Metodo di prova	Prova di laboratorio	Prova di cantiere
Fluidità	>600 mm	UNI 11041	si	si
Tempo di spandimento (per raggiungere il diametro di 500 mm)	≤12 s	UNI 11041	si	si
Deformabilità (tempo di efflusso dall'imbuto a V)	(4 + 12) s	UNI 11042	si	si
Scorrimento confinato (attraverso l'anello a J)	$\Delta\Phi \leq 50$ mm rispetto allo scorrimento senza anello	UNI 11045	si	si
Scorrimento confinato (scatola ad L)	$H_2/H_1 > 0,80$	UNI 11043	si	no
Scorrimento confinato (scatola ad U)	$\Delta h \leq 30$ mm	UNI 11044	si	no
Stabilità alla sedimentazione (imbuto a V dopo 5 min)	Valore iniziale +3 s	UNI 11042	si	si

Prospetti1 Caratteristiche dei calcestruzzi autocompattanti allo stato fresco e relativi valori di accettazione

UNI 12350-8-9-10-11-12 (ex. UNI 11041 -2-3-5), **ed UNI 11044**, , ognuna delle quali tratta un preciso metodo di verifica, identificando i criteri e le modalità esecutive con i relativi limiti di accettazione, che sono riportati per praticità in una tabella (Prospetto 1) nella norma UNI 11040.

2.5 Le proprietà dei calcestruzzi autocompattanti

L'autocompattabilità è una caratteristica che presenta molte sfaccettature anche di natura più complessa rispetto alla mera capacità del calcestruzzo di poter fluire facilmente all'interno della cassaforma garantendo velocità di esecuzione del getto maggiori di quelle conseguibili con i conglomerati superfluidi. Pertanto, un approccio più rigoroso all'utilizzo degli SCC, finalizzato a sfruttare appieno le potenzialità da questi offerti, impone di definire quali sono le proprietà che il conglomerato deve possedere per poter essere definito autocompattante anticipando sin d'ora che la fluidità è solo uno dei parametri che concorrono all'ottenimento dell'autocompattabilità.

Un calcestruzzo autocompattante deve essere caratterizzato:

- da una **elevata deformabilità** (o capacità di scorrimento in assenza di ostacoli): questa proprietà individua la capacità del materiale di modificare la sua forma per effetto del solo peso proprio ed è connessa alla possibilità che lo stesso sia in grado di raggiungere distanze più o meno elevate dal punto in cui viene introdotto all'interno del cassero;
- da una **elevata resistenza alla segregazione** che consenta di realizzare elementi in calcestruzzo armato il cui volume è costituito interamente da materiale di caratteristiche omogenee. Questo significa, in sostanza, che la massa volumica e, quindi, le proprietà elasto-meccaniche del calcestruzzo in opera risultino sostanzialmente identiche in tutto il volume dell'elemento strutturale realizzato. Per conseguire questo obiettivo il calcestruzzo autocompattante deve essere dotato:
 - di **resistenza alla segregazione esterna**: esso, cioè, deve poter minimizzare il rischio di separazione degli ingredienti durante il getto all'interno dei casseri. E' evidente che la segregazione esterna è strettamente connessa con le modalità delle operazioni di posa ed, in particolare, con l'altezza di caduta libera del conglomerato all'interno della cassaforma, tuttavia, questa problematica può essere opportunamente mitigata scegliendo accuratamente gli ingredienti per il confezionamento del calcestruzzo e adottando specifici provvedimenti in termini di composizione dell'impasto;

- di **resistenza alla segregazione di flusso**: per i conglomerati tradizionali la stesa, dopo il getto, avviene per strati di circa 20-30 cm muovendo avanti e indietro il tubo forma e, quindi, senza apprezzabili scorrimenti del calcestruzzo dal punto in cui viene introdotto all'interno del cassero. Grazie all'elevata fluidità agli SCC, invece, si richiede di percorrere anche alcuni metri dal punto di introduzione nella cassaforma. Pertanto, gli SCC non debbono subire durante lo scorrimento la smiscelazione degli ingredienti. A questo proposito, in particolare, la malta di cemento (acqua, cemento, aggiunte minerali e frazioni fini della sabbia) deve essere dotata di sufficiente viscosità per poter trasportare i granuli grossi degli aggregati, soprattutto quando il conglomerato deve poter fluire attraverso dei restringimenti di sezione o in zone particolarmente congestionate dalle armature. Questa particolare resistenza di flusso viene identificata come mobilità in spazi ristretti o anche come capacità di attraversamento (*passing ability*) e risulta una delle proprietà fondamentali degli autocompattanti attesa la naturale tendenza degli aggregati grossi, per effetto dell'aumento del numero di collisioni in prossimità del restringimento di sezione, a procedere con una minore velocità rispetto alla malta di cemento e, quindi, a creare il blocco del flusso del conglomerato;
- di **resistenza alla segregazione interna**: a riempimento avvenuto della cassaforma il calcestruzzo autocompattante, infine, deve evitare un'eccessiva sedimentazione degli aggregati grossi sul fondo e limitare il volume di acqua di bleeding che perviene sulle superfici estradossali del getto.

In base a quanto sopra esposto si intuisce, quindi, che la fluidità (deformabilità) è solo una, e forse nemmeno la più importante, delle proprietà richieste per conseguire l'autocompattabilità. Pertanto, le specifiche di capitolato relative a questi calcestruzzi dovranno riguardare non solo la capacità di scorrimento del materiale, ma dovranno essere finalizzate anche a definire la resistenza alla segregazione del calcestruzzo fondamentale per poter ambire ad una qualità della struttura sostanzialmente indipendente dalle modalità di posa e di compattazione del conglomerato.

2.6 I metodi per la determinazione delle proprietà dei calcestruzzi autocompattanti

L'autocompattabilità, come specificato al precedente paragrafo, è il risultato del soddisfacimento di diverse proprietà reologiche del conglomerato che compendiano le capacità di scorrimento in assenza di ostacoli, la mobilità in sezioni congestionate di armatura ed, in generale, la resistenza alla segregazione dell'impasto durante la posa e a riempimento avvenuto dei casseri.

La quantificazione di proprietà reologiche così e antitetiche può essere effettuata avvalendosi di diversi metodi di misura ognuno finalizzato alla misurazione di una caratteristica specifica degli SCC. Quindi, contrariamente a quanto avviene per i calcestruzzi tradizionali, dove la misura della lavorabilità è sufficiente per avere un quadro abbastanza esaustivo delle proprietà reologiche del materiale, per i calcestruzzi autocompattanti è, invece, necessario ricorrere a diverse metodologie di indagine se si vogliono cogliere i vari aspetti della autocompattabilità.

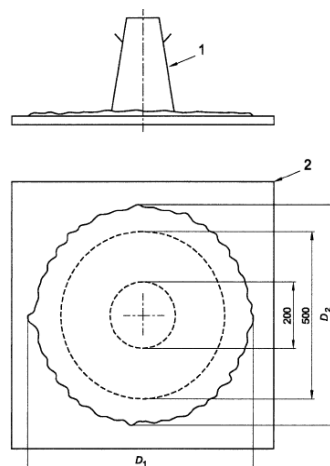
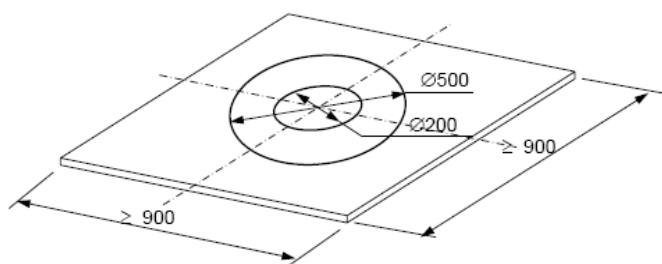
La norma 11040 e successive hanno definito i parametri di riferimento per ciascun test di lavorabilità; risulta chiaro che essendo complementari tra loro, i test di caratterizzazione specifici per le proprietà dell'autocompattante esplicitate nel paragrafo precedente, devono dare risultanze positive perché una miscela di calcestruzzo possa essere classificata come SCC.

La tabella seguente illustra la correlazione esistente tra i diversi test di caratterizzazione e le proprietà che definiscono la lavorabilità di un calcestruzzo autocompattante:

Metodo di prova	Proprietà
Spandimento (Slumpflow) UNI 12350-8	Fluidità
Imbuto a V (V-funnel) UNI 12350-9	Deformabilità allo stato fresco
	Resistenza alla segregazione
Scatola ad L (L-box) UNI 12350-10	Mobilità in spazi ristretti
Scatola ad U (U-box) UNI 11044	Mobilità in spazi ristretti
Anello giapponese (J-Ring) UNI 12350-12	Mobilità in spazi ristretti
Prova di resistenza a Segregazione (al setaccio) UNI 12350-11	Resistenza alla segregazione

2.6.1. Il cono di Abrams e la misura dello Slump-flow, UNI 12350-8

Il cono di Abrams impiegato per la misura dello slump nei calcestruzzi tradizionali può essere utilizzato per valutare la capacità di scorrimento del calcestruzzo autocompattante in assenza di ostacoli oltre che per trarre utili indicazioni sulla tendenza del conglomerato alla segregazione di flusso. La prova consiste nell'introdurre il calcestruzzo all'interno del cono di Abrams appoggiato su una piastra liscia di 900 x 900 mm e, successivamente, nel sollevarlo lasciando fluire il calcestruzzo, azionare un cronometro nel momento in cui lo stesso viene sollevato.



Le determinazioni che vengono effettuate sono le seguenti:

- tempo necessario perché la focaccia di calcestruzzo raggiunga un diametro pari a 500 mm (t_{500});

- diametro finale della focaccia di calcestruzzo ($d_f = \text{slump-flow}$) dopo che lo stesso ha cessato di fluire, che è la media di due diametri D_1 e D_2 misurati ortogonalmente.

La misura dello slump-flow è proporzionale alla capacità di scorrimento del materiale in assenza di ostacoli: maggiore il valore di d_f e più elevata è la deformabilità del materiale, cioè la sua capacità di raggiungere zone distanti dal punto di introduzione del calcestruzzo nel cassero. I valori minimi di d_f richiesti per un calcestruzzo autocompattante variano a seconda delle normative e raccomandazioni: ad esempio, la **norma UNI 11040** e le raccomandazioni EFNARC richiedono per d_f valori superiori rispettivamente a 600 mm e 650 mm. *Le Linee Guida europee e la UNI 206-9, oltre a fissare un valore minimo per d_f (550 mm), suddividono i calcestruzzi autocompattanti, relativamente alla misura dello slump-flow, in tre classi* (Tab. 1).

Tabella 1 Valori massimi e minimi di d_f richiesti da diverse norme e classificazione dei calcestruzzi autocompattanti in base al valore dello slump-flow in accordo alle Linee Guida europee.

NORMA	SFmin (mm)	SFmax (mm)	SF1 (mm)	SF2 (mm)	SF3 (mm)
UNI 12350-8	600	-	-	-	-
EFNARC	650	800	-	-	-
LINEE GUIDA	550	850	550-650	660-750	760-850

I valori di t_{500} , invece, sono connessi con la viscosità del materiale e, quindi, indirettamente con la resistenza alla segregazione. Calcestruzzi che evidenziano bassi valori di t_{500} risultano poco viscosi con una capacità di scorrimento elevata, ma allo stesso tempo con una maggiore tendenza alla segregazione rispetto a quelli che denotano alti valori di t_{500} . Anche per questa misura le normative e raccomandazioni presentano visioni abbastanza difformi se si tiene conto che la norma UNI 12350-8 impone per t_{500} un valore massimo di 12 secondi, mentre le raccomandazioni EFNARC suggeriscono valori compresi tra 2 e 5 secondi. *Le Linee Guida europee e la UNI 206-9, invece, suddividono i calcestruzzi in due classi quelli con t_{500} inferiori o pari a 2 s o con t_{500} maggiore di 2 s* (Tab. 2).

Tabella 2 Valori massimi e minimi di t_{500} richiesti da diverse norme e classificazione dei calcestruzzi autocompattanti in base al valore dello slump-flow in accordo alle Linee Guida europee.

NORMA	$t_{500 \text{ min}}$ (s)	$t_{500 \text{ max}}$ (s)	t_{500} (s)	t_{500} (s)
			VS1	VS2
UNI 12350-8	-	12	-	-
EFNARC	2	5	-	-
LINEE GUIDA	-	-	≤ 2	>2

2.6.2. L’imbuto a forma di V (V-funnel), UNI 12350-9

La resistenza alla segregazione del calcestruzzo autocompattante può essere accertata anche attraverso la prova condotta con il V-funnel: essa consiste nel misurare il tempo necessario per il calcestruzzo a fuoriuscire completamente da un imbuto a forma di V subito dopo il termine della miscelazione dell’impasto (t_0) e dopo 5 minuti (t_5) di permanenza all’interno dell’imbuto. Il valore di t_0 è correlato alla viscosità del materiale: maggiore è il tempo di svuotamento, più elevata è la viscosità del sistema e, quindi, minore è la sua capacità di flusso. Per contro, valori di t_0 elevati sono indice di una maggiore resistenza alla

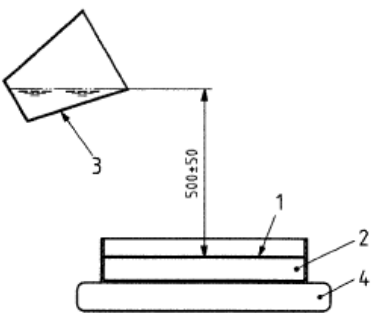


segregazione dell’impasto. Anche riguardo a questa misura le diverse raccomandazioni non presentano uniformità di vedute. Infatti, sia la norma UNI 12350-9 che le raccomandazioni EFNARC suggeriscono tempi di svuotamento compresi tra 4 e 12 secondi. Le Linee Guida europee, invece, non specificano il valore minimo per t_0 , ma

suddividono i calcestruzzi autocompattanti in due classi relativamente al tempo di svuotamento al V-funnel: la prima caratterizzata da valori di t_0 inferiori o uguali a 8 secondi; la seconda classe con t_0 compreso tra 9 e 25 secondi (Tab.3). Le Linee Guida, inoltre, ritengono che la misura del tempo di svuotamento sia correlata a quella del t_{500} nella prova dello slump-flow procedendo alla classificazione del calcestruzzo, relativamente alla resistenza alla segregazione, utilizzando indistintamente una delle due misure (Tab.3). E' importante notare che ai fini della resistenza alla segregazione è altresì opportuno che la differenza tra t_5 e t_0 risulti compresa tra 0 e 3 secondi (Tab.3). Se la differenza tra le due misure, infatti, dovesse risultare maggiore, questo sarebbe indice di una tendenza del conglomerato alla segregazione interna e al blocking durante il flusso.

Relativamente alla resistenza alla segregazione le Linee Guida europee prevedono anche l'esecuzione di una **Prova di resistenza a segregazione con setaccio UNI 12350-11**:

La prova di resistenza a segregazione al setaccio è utilizzata per valutare la resistenza alla segregazione del calcestruzzo autocompattante, secondo Le Linee Guida Europee. Dopo il campionamento, il calcestruzzo fresco è lasciato riposare per 15 minuti e si prende nota dell'eventuale separazione di acqua d'essudamento. La parte superiore del campione viene successivamente versata in un setaccio che presenta aperture con maglia quadrata di lato 5 mm di lato. Una massa pari a $(4,8 \pm 0,2)$ kg, da un'altezza di (500 ± 50) mm. Dopo 2 minuti si registra la massa del materiale che è passato attraverso il setaccio. Il rapporto disegregazione è infine calcolato come la percentuale del campione che è passata attraverso il setaccio. Ovviamente, la tendenza alla segregazione dell'impasto sarà tanto maggiore quanto più elevata è la perdita causata dalla separazione della pasta di cemento dall'aggregato grosso a causa della sua scarsa coesione ed eccessiva fluidità. Due sono le classi previste: SR1 e SR2 (Segregation Resistance: SR) con perdita di massa inferiore rispettivamente al 20% e al 15%.



L'apparecchiatura, come in figura, è costituita da: 1. Setaccio piano perforato, avente aperture si sezione quadrata di 5 mm di lato; il telaio di 300 mm di diametro e alto 30 mm, conforme alla ISO 3310-2; 2. recipiente dal quale può essere facilmente rimosso il setaccio per sollevamento verticale; 3. contenitore per il campione di calcestruzzo, di plastica oppure metallico, avente diametro interno di (300 ± 10) mm, capacità di 11 litri e il relativo coperchio; 4. Bilancia con piattaforma piana sulla quale si possa posizionare il recipiente del setaccio, la quale bilancia deve avere una portata di almeno 10 kg; 5. cronometro; 6. termometro.

Tabella 3 Valori minimi e massimi del tempo di svuotamento al V-funnel in accordo alle norma UNI 12350-9, alle raccomandazioni EFNARC e classificazione dei calcestruzzi in termini di resistenza alla segregazione in accordo alle Linee Guida europee

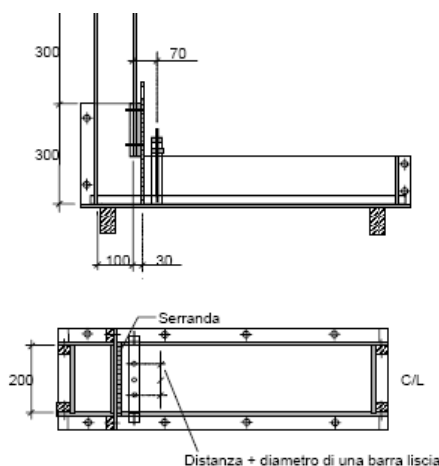
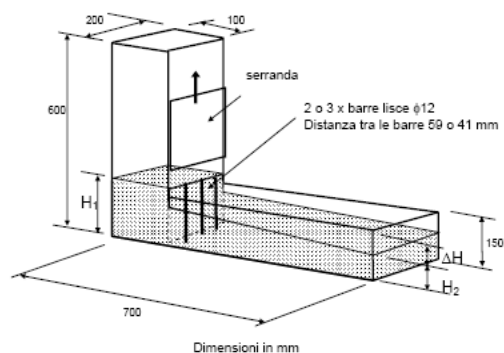
NORMA	t_{0min} (s)	t_{0max} (s)	$(t_5-t_0)min$ (s)	$(t_5-t_0)max$ (s)	VS1/VF1/SR1 $(t_{500}, t_0, SR1)$	VS2/VF2/SR2 $(t_{500}, t_0, SR2)$
UNI 11040	4	12	0	3	-	-
EFNARC	6	12	0	3	-	-
LINEE GUIDA	-	25	-	-	$\leq 2\text{ s}, \leq 8\text{ s},$ $\leq 20\%$	$>2\text{ s}, 9-25\text{ s},$ $\leq 15\%$

2.6.3. La scatola ad L (L-Box), UNI 12350-10

La scatola ad L è costituita da una porzione verticale in cui viene introdotto il calcestruzzo il quale, inizialmente, è impedito a fuoriuscire dal basso grazie alla presenza di una saracinesca alla cui apertura il conglomerato fluisce nella porzione orizzontale dell'attrezzatura attraversando un graticcio costituito da due oppure da tre armature disposte verticalmente. La valutazione della capacità di attraversamento viene effettuata misurando la differenza di altezza del conglomerato nel punto più lontano (h_1) raggiunto e

quella valutata a tergo della saracinesca nella porzione verticale dell'apparecchiatura (h_2).

La capacità di



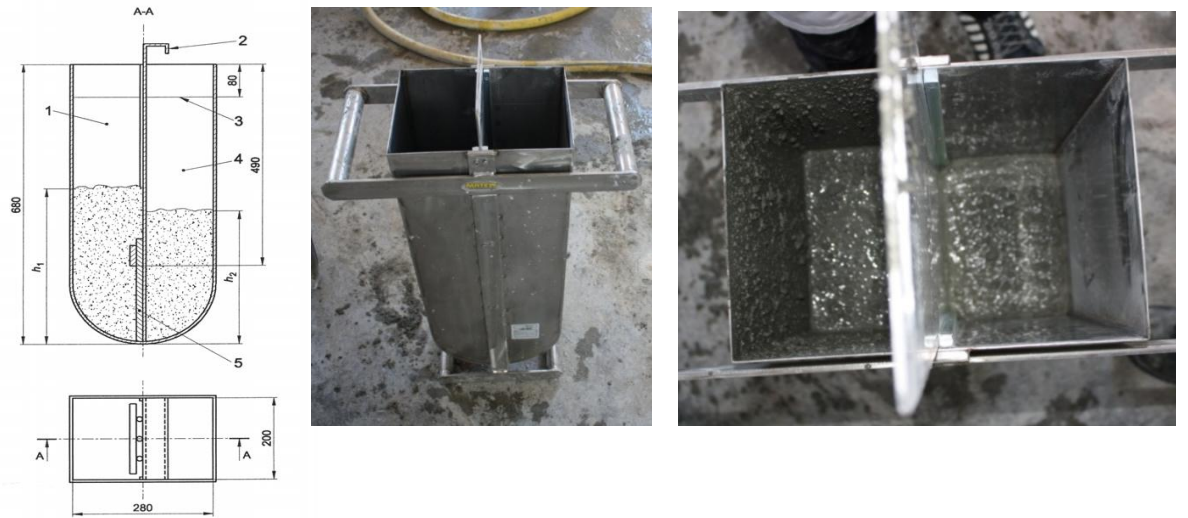
attraversamento (passing ability) sarà tanto più elevata quanto più il rapporto h_1/h_2 si approssima ad 1 e viene ritenuta sufficiente (sia dalla norma UNI 12350-10 che dalle raccomandazioni EFNARC) se il rapporto h_1/h_2 risulta almeno pari a 0.80. Le Linee Guida, come per le altre proprietà che caratterizzano l'autocompattabilità, distingue i calcestruzzi in termini di passing ability in due classi: entrambe debbono possedere un rapporto h_1/h_2 almeno pari a 0.80, ma la prima (PA1) e la seconda classe (PA2) di calcestruzzi conseguono questo risultato fluendo, rispettivamente, attraverso due o tre armature (Tab.4).

Tabella 4 Valori massimi e minimi per le prove di passing ability con la scatola ad L in accordo alle norma UNI 12350-10, alle raccomandazioni EFNARC e classificazione dei calcestruzzi in termini di capacità di attraversamento secondo le Linee Guida.

NORMA	SCATOLA AD L:	SCATOLA AD L	PA1	PA2
	(h ₁ /h ₂)min	(h ₁ /h ₂)max	(due barre)	(tre barre)
UNI 12350-10	0.80	1.0	-	-
EFNARC	0.80	1.0	-	-
LINEE GUIDA	0.80	1.0	> 0.80	> 0.80

2.6.4. La scatola ad U (U-Box) UNI 11044

La scatola ad U (sviluppata nel centro di ricerca e Tecnologia della Taisei Corporation in Giappone) è costituita da un condotto a sezione rettangolare che è diviso in due comparti da una botola mediana sollevabile. Una griglia è posta tra i due comparti ed è composta da barre di rinforzo con diametro di 13 mm ad interasse di 50 mm; questo crea uno spazio di 35 mm tra le barre. La sezione a sinistra viene riempita di calcestruzzo, una volta aperta la botola quest’ultimo fluisce verso l’alto nell’altro comparto, attraverso la griglia, e viene misurata l’altezza del calcestruzzo in entrambe le sezioni. Se il calcestruzzo fluisce liberamente come l’acqua, al termine del moto di flusso, si disporrà allo stesso livello in entrambi i comparti, così Δh detta **altezza di riempimento** = $H_2-H_1=0$. Pertanto tanto più vicino è il valore di prova, altezza di riempimento allo zero, tanto più fluido sarà il



calcestruzzo. La norma UNI 11040 limita l'altezza di riempimento a $\Delta h \leq 30\text{mm}$ affinché l'autocompattante abbia ottime capacità di mobilità negli spazi ristretti.

2.6.5. Anello Giapponese - Japanese Ring – J-RING, UNI 12350-12

J-ring è un anello di acciaio forato (2) dove sono alloggiare delle barre a sezione circolare simulanti le armature presenti negli elementi in calcestruzzo armato. La prova consiste nel riempire di calcestruzzo il cono di Abrams (1) sistemato all'interno dell'anello, appoggiati entrambi su una piastra liscia con una superficie piana di almeno 900 mm x 900 mm (3) e, successivamente, nel sollevarlo lasciando fluire il calcestruzzo (4) attraverso le barre dello J-Ring. La differenza tra la misura di spandimento con e senza J-Ring deve essere inferiore a $\Delta\phi \leq 50\text{mm}$, e l'altezza tra il calcestruzzo all'interno ed all'esterno dell'anello deve risultare inferiore a 10 mm affinché l'autocompattante abbia buone capacità di attraversamento alle barre. Per tal motivo le linee guida definiscono due classi di capacità di attraversamento nell'anello con intercapedini larghe a 12 barre o intercapedini strette a 16 barre (Tab .5)

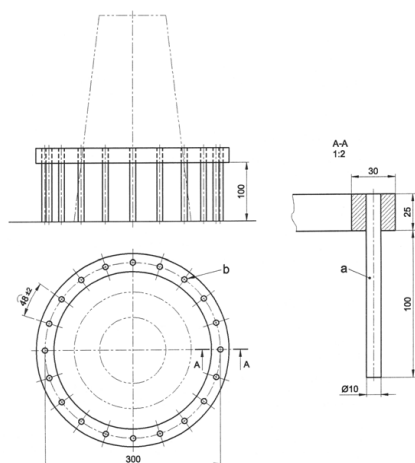


Tabella 5 Valori per le prove di passing ability per il j-ring in accordo alle Linee Guida

CLASSI DI CAPACITÀ DI ATTRAVERSAMENTO – ANELLO J a), b) “PASSING ABILITY” - IL J-RING Altezza all'interno e all'esterno dell'anello J in mm	
J-RING CON INTERCAPEDINI LARGHE 12 BARRE D'ARMATURA	J-RING CON INTERCAPEDINI STRETTE 16 BARRE D'ARMATURA
CLASSE PJ1	CLASSE PJ2
< 10	< 10

2.7 La scelta del calcestruzzo autocompattante in relazione alla tipologia di struttura da realizzare

Al paragrafo precedente è stato evidenziato come, in sostanza, la valutazione delle caratteristiche di autocompattabilità richiede il ricorso a diverse metodi di prova in quanto nessuno di essi preso singolarmente è in grado di fornire un quadro esaustivo circa le proprietà reologiche richieste per gli SCC. Questo significa che calcestruzzi autocompattanti che posseggono stesse proprietà di scorrimento (ad esempio, perché evidenziano un medesimo valore dello slump-flow) possono, allo stesso tempo, essere contraddistinti da una tendenza alla segregazione o da una capacità di attraversamento completamente differenti. Per questo motivo, basare la scelta del calcestruzzo autocompattante sui risultati desunti da una soltanto delle metodologie di prova sopra menzionate può risultare del tutto erroneo. Inoltre, è opportuno far presente che non necessariamente per tutte le strutture è opportuno ricorrere all'impiego di calcestruzzi autocompattanti contraddistinti dalla massima capacità di scorrimento (SF3) o dalla minore viscosità (VF1) perché questa scelta espone al rischio di una maggiore tendenza dell'impasto a segregare. Allo stesso modo, non è detto che la scelta di viscosità elevate possa rivelarsi sempre la soluzione migliore per un calcestruzzo autocompattante in quanto se, da una parte, questo conduce ad una maggiore resistenza alla segregazione, dall'altra riduce la capacità di scorrimento che potrebbe, invece, rivelarsi fondamentale quando per la ridotta accessibilità dei punti di getto si richiede che il conglomerato fluisca per lunghe distanze. Si intuisce, quindi, che la scelta del calcestruzzo autocompattante deve tenere

conto delle particolari esigenze derivanti dalla difficoltà di esecuzione del getto, della geometria e della percentuale dei ferri, della distanza che il calcestruzzo deve percorrere, al pari di quanto avviene nella scelta della lavorabilità dei calcestruzzi tradizionali con l'aggravante che, a causa dell'elevata fluidità del conglomerato per la necessità di non dover ricorrere ad alcuna forma di vibrazione esterna, la tendenza alla segregazione degli SCC risulta esasperata.

In accordo con quanto sopra riportato si possono fare ora alcune considerazioni riguardo alle proprietà dei calcestruzzi autocompattanti in relazione alla geometria dell'elemento strutturale, della densità dei ferri di armatura e della distanza percorsa dal calcestruzzo (Prospetto 2):

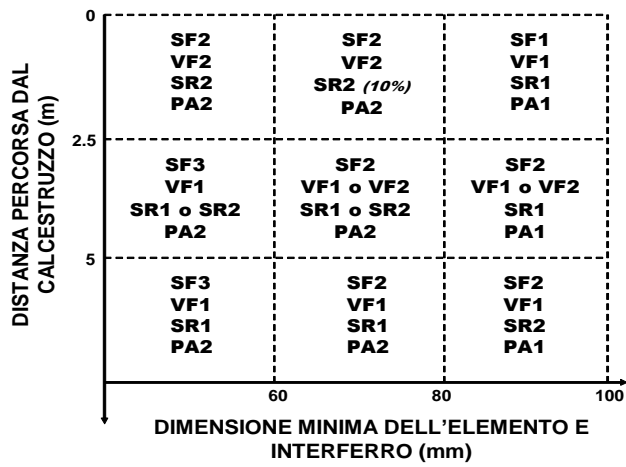
- *la classe di spandimento SF1* è appropriata per strutture debolmente armate quando al calcestruzzo non si richiede di percorrere distanze superiori ai 2.5 m e il getto avviene dall'alto mediante l'utilizzo della pompa (solette di civile abitazione) oppure quando occorre gettare elementi verticali quali pali e paratie di fondazione;
- *la classe di spandimento SF2* si presta per la realizzazione della maggior parte delle applicazioni correnti quali la realizzazione di strutture verticali di notevole altezza, muri di sostegno e pilastri. Inoltre, essa risulta particolarmente indicata per la realizzazione di platee di fondazione e pile da ponte;
- *la classe di spandimento SF3* è idonea per la realizzazione di strutture molto congestionate dalla presenza di ferri di armatura quali i solai con travi a spessore, i nuclei ascensore, le pareti sottili oppure i muri di notevole altezza, soprattutto quando il getto del conglomerato viene effettuato mediante pompa inserita sul fondo del cassero. E' da notare come questa possibilità di gettare dal basso verso l'alto viene offerta grazie all'elevata fluidità degli SCC e ha il vantaggio di eliminare completamente i nidi di ghiaia per segregazione esterna oltre a favorire l'espulsione dell'aria dal calcestruzzo e, quindi, a garantire l'ottenimento di un faccia-vista di eccellente qualità. Il pompaggio dal basso verso l'alto del calcestruzzo viene effettuato collegando la pompa con una speciale connettore con valvole a pistone. Dopo aver terminato il pompaggio, la valvola viene chiusa e bloccata e il calcestruzzo che sporge

dal filo del cassero viene spinto verso l'interno della sponda mediante un perno apposito;



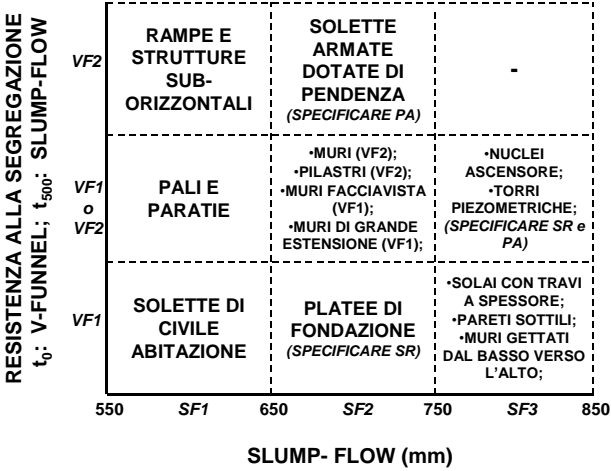
- la classe di viscosità **VF1** si presta, grazie al buon potere di autolivellamento e alle migliori proprietà di espulsione dell'aria rispetto alla VF2, per essere impiegata in quelle strutture ove il facciavista rappresenta una caratteristica predominante per l'opera. Inoltre, questa classe di consistenza risulta idonea anche per la realizzazione di strutture di grande estensione (ad esempio, le platee di fondazione e i muri di notevole sviluppo lineare) in quanto presenta, per via della più bassa viscosità rispetto alla classe VF2, minore tendenza a creare “giunti freddi” in corrispondenza delle riprese di getto;
- la classe di viscosità **VF2** consente di realizzare strutture sub-orizzontali quali rampe di accesso ai garage o ai parcheggi multipiano;
- la capacità di attraversamento (passing ability) è connessa con la dimensione minima dell'elemento strutturale e con l'interferro. Generalmente, si richiede una classe di attraversamento **PA1** o **PA2** in quelle strutture rispettivamente con dimensioni minime/interferri compresi tra 80 e 100 mm oppure minori;
- relativamente alla resistenza alla segregazione (SR) essa è connessa con la distanza che deve percorrere il calcestruzzo e con le dimensioni dell'interferro: distanze inferiori a 5

m e interferri maggiori di 80 mm richiedono l’impiego di calcestruzzi **SR1**. La classe **SR2**, invece, risulta necessaria per distanze di scorrimento superiori a 5 m o per interferri minori di 80 mm.



Prospetto 2 Scelta dei parametri di autocompattabilità in funzione della geometria dell’elemento strutturale, della densità dei ferri di armatura e della distanza percorsa dal calcestruzzo.

In base a quanto sopra esposto, nel Prospetto 3 viene riportato un abaco con le proprietà richieste per il calcestruzzo autocompattante in funzione della tipologia strutturale cui esso è destinato. Per ognuna delle tipologie strutturali il conglomerato viene identificato attraverso le due proprietà di base (slump-flow e tempo di svuotamento al V-funnel) integrate dalle specifiche relative alla classe di resistenza alla segregazione (SR) e alla capacità di attraversamento (PA).



Prospetto 3 Proprietà reologiche dei calcestruzzi autocompattanti in funzione della tipologia strutturale cui il conglomerato è destinato.

2.8 Reologia dei calcestruzzi autocompattanti

La reologia è la scienza che studia le deformazioni subite da un corpo per effetto delle sollecitazioni cui esso è sottoposto. Essa, pertanto, può applicarsi allo studio dei sistemi cementizi che sono deformabili e capaci di scorrere sotto l’effetto di sforzi tangenziali. Per un fluido ideale (newtoniano) esiste una proporzionalità lineare tra lo sforzo tangenziale applicato (τ) e il gradiente della velocità di scorrimento (D):

$$\tau = \eta \cdot D$$

La formula evidenzia che la velocità acquisita dal liquido dipende, oltre che dallo sforzo tangenziale applicato, anche dalla viscosità del materiale (η): quest’ultima rappresenta la resistenza opposta dal liquido alla variazione di velocità. In sostanza, la viscosità rappresenta lo sforzo tangenziale necessario per promuovere una variazione unitaria della velocità del liquido. In un liquido poco viscoso come l’acqua la viscosità risulta paria a 1 mPa’s, mentre in una pasta di cemento vale 10^3 mPa’s. Questo significa che per produrre in una pasta di cemento una variazione unitaria della velocità occorre applicare uno sforzo

tangenziale di tre ordini di grandezza maggiore di quello necessario per produrre lo stesso effetto nell'acqua.

Le paste di cemento, al contrario dei fluidi newtoniani caratterizzati da un gradiente di scorrimento proporzionale alla tensione tangenziale applicata, si comportano come dei fluidi plastici per i quali il comportamento reologico è descritto dall'equazione di Bingham:

$$\tau = f + \eta \cdot D$$

dove f è il limite di scorrimento (o coesione) cioè la tensione tangenziale minima che occorre applicare per mantenere il corpo di Bingham allo stato liquido.

Nell'equazione di Bingham il valore di f è proporzionale sia alla capacità di scorrimento del materiale che alla resistenza alla segregazione: maggiore la coesione f , minore sarà la tendenza del materiale a separarsi, ma anche minore la deformabilità. Pertanto, al fine di produrre un calcestruzzo autocompattante è necessario garantire il raggiungimento di un valore di coesione sufficientemente elevato per attenuare il rischio di segregazione dell'impasto senza pregiudicare la deformabilità sotto l'azione di sforzi tangenziali modesti quali quelli derivanti nella posa in opera degli SCC dal solo peso proprio del conglomerato.

Tra i fluidi di Bingham quelli che meglio approssimano le caratteristiche richieste per i calcestruzzi autocompattanti sono i cosiddetti fluidi pseudo-plastici, caratterizzati, cioè da una viscosità plastica elevata per bassi valori dello sforzo tangenziale applicato (η_1) e da una viscosità plastica ridotta per valori elevati di τ (η_2). Valori elevati di η_1 garantiscono una buona resistenza alla segregazione di flusso (*passing ability*). Per contro, valori ridotti di η_2 consentono di mantenere alte le proprietà di autolivellamento del calcestruzzo anche sotto l'azione di modesti sforzi tangenziali generati dalla caduta e dal peso proprio del materiale in assenza di vibrazione.

Purtroppo, i fattori che governano la reologia del calcestruzzo mostrano nei confronti dei parametri reologici sopra descritti (coesione e viscosità plastica) influenze antitetiche ai fini del conseguimento dell'autocompattabilità. Generalmente, i fattori che aumentano la coesione inducono anche un incremento della viscosità plastica (e viceversa).

2.8.1. Il cemento

Le caratteristiche del cemento che influenzano la reologia del calcestruzzo sono sostanzialmente la finezza e il contenuto di C_3S . Cementi fini e ricchi di C_3S aumentano il limite di scorrimento e la viscosità. Per contro, i cementi di tipo II al calcare e quelli alla loppa d'altoforno e ancor più i cementi d'altoforno sono caratterizzati, a pari classi di resistenza, da una minore coesione, ma anche da una minore viscosità. Pertanto, ai fini del soddisfacimento dei requisiti di autocompattabilità sarà opportuno preferire cementi di alta classe di resistenza e ricchi in clinker quando l'obiettivo è quello di migliorare la resistenza alla segregazione dell'impasto e aumentare la viscosità del sistema. Per contro, l'impiego di cementi al calcare o d'altoforno può essere previsto se è più importante esaltare le capacità di scorrimento del materiale.

2.8.2. Il rapporto acqua/cemento

L'influenza del rapporto a/c sulle proprietà del calcestruzzo fresco sono identiche a quelle esercitate dalla finezza e dal contenuto di cemento: diminuendo il rapporto a/c aumenta la coesione e anche la viscosità plastica. Da questo si intuisce che per soddisfare le esigenze di autocompattabilità è necessario adottare rapporti acqua /cemento non troppo bassi se non si vuole pregiudicare le capacità di scorrimento dell'impasto. Come meglio verrà specificato nel paragrafo che segue sarà necessario adottare un rapporto tra il volume di acqua e quello dei materiali finissimi che consenta di ottimizzare sia la capacità di scorrimento che la resistenza alla segregazione dell'impasto.

2.8.3. Gli additivi ritardanti e superfluidificanti

Gli additivi esplicano sulle proprietà reologiche influenze diverse a seconda della loro natura. Gli additivi ritardanti, ad esempio, determinano, a parità di tempo trascorso dalla miscelazione, una riduzione sia della coesione che della viscosità plastica rispetto ad un impasto non additivato. Conseguentemente, essi possono apportare benefici sulle capacità di scorrimento del conglomerato, ma tendono, per effetto della diminuzione di viscosità, ad esasperare i fenomeni di segregazione del calcestruzzo. Essi, inoltre, possono determinare un allungamento dei tempi cui le casseforme sono sottoposte alla massima spinta. Gli additivi maggiormente utilizzati per la produzione degli SCC sono quelli *superfluidificanti*. Essi vengono impiegati, generalmente, per aumentare la fluidità mantenendo invariato il dosaggio di cemento (pari rapporto a/c). Pertanto, essi consentono di ridurre la viscosità del sistema lasciando sostanzialmente invariata la resistenza alla segregazione del calcestruzzo. Per migliorare questa proprietà nel confezionamento degli SCC si fa ricorso all'utilizzo di additivi modificatori di viscosità.

2.8.4. Gli additivi modificatori della viscosità

Il termine di additivi modificatori della viscosità (Viscosity Modifying Agent: VMA) individua una categoria di prodotti cellulosici modificati o polimeri ad alto peso molecolare utilizzati già in passato per rendere pompabili i calcestruzzi magri (con dosaggi di cemento inferiori a 260 Kg/m^3). Gli agenti modificatori di viscosità impiegati per la produzione dei calcestruzzi autocompattanti, invece, includono, oltre ai polimeri idrosolubili a base di cellulosa, anche quelli a base di glicole e i bio-polimeri. Indipendentemente, dalla loro natura gli agenti modificatori di viscosità destinati al settore del calcestruzzo autocompattante debbono possedere i seguenti requisiti:

- solubilità elevata nell'ambiente alcalino della sospensione cementizia;
- ridotta interferenza sulla reazione di idratazione del cemento;
- capacità di conferire al calcestruzzo la capacità di attraversamento senza pregiudicare le proprietà di flusso del conglomerato;

- possibilità di essere introdotti negli impasti mediante i dosatori di liquidi normalmente disponibili nelle centrali di betonaggio;
- incidenza sul costo unitario del conglomerato inferiore a quello che si dovrebbe sostenere con altre soluzioni per conseguire lo stesso miglioramento prestazionale determinato dall'aggiunta dell' VMA;
- conferire all'impasto "robustezza" cioè la capacità di non modificare le proprie prestazioni per effetto delle oscillazioni nel dosaggio dell'acqua introdotta nel mescolatore.

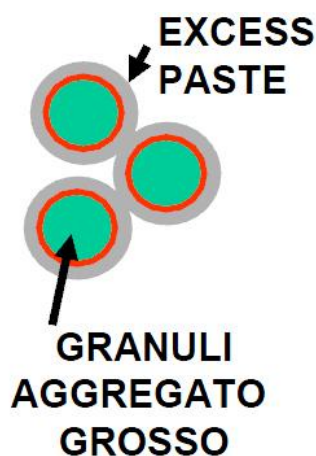
2.9 Il proporzionamento dei calcestruzzi autocompattanti

Al fine di conseguire le caratteristiche di scorrimento, di viscosità, resistenza alla segregazione e capacità di attraversamento è opportuno, come evidenziato al precedente paragrafo, ricorrere all'impiego congiunto di additivi superfluidificanti e agenti modificatori di viscosità.

Gli additivi superfluidificanti, al contrario di quanto avviene nei calcestruzzi tradizionali, dove vengono impiegati per ridurre l'acqua di impasto e il dosaggio di cemento lasciando immutata la lavorabilità, nella produzione degli autocompattanti vengono utilizzati mantenendo fisso il dosaggio di cemento per aumentare la lavorabilità del conglomerato. Questa modalità d'impiego consente di ottenere una riduzione della viscosità plastica per alti sforzi di taglio (η_2) e, conseguentemente, un aumento della capacità di scorrimento del calcestruzzo. La diminuzione della viscosità plastica avviene senza modificare significativamente la coesione dell'impasto. Pertanto, la resistenza alla segregazione dell'impasto a riposo (la segregazione interna a riempimento avvenuto sotto sforzo di taglio nullo) risulterà uguale a quella di un analogo calcestruzzo confezionato con lo stesso volume di acqua. L'aggiunta del superfluidificante, tuttavia, determina anche una drastica riduzione della viscosità per bassi sforzi di taglio e, quindi un peggioramento delle capacità di attraversamento del materiale attraverso sezioni congestionate. L'impiego degli agenti modificatori della viscosità è, pertanto, finalizzato ad un miglioramento della passing

ability senza modificare η_2 e, quindi, senza pregiudicare la capacità di scorrimento laterale del conglomerato.

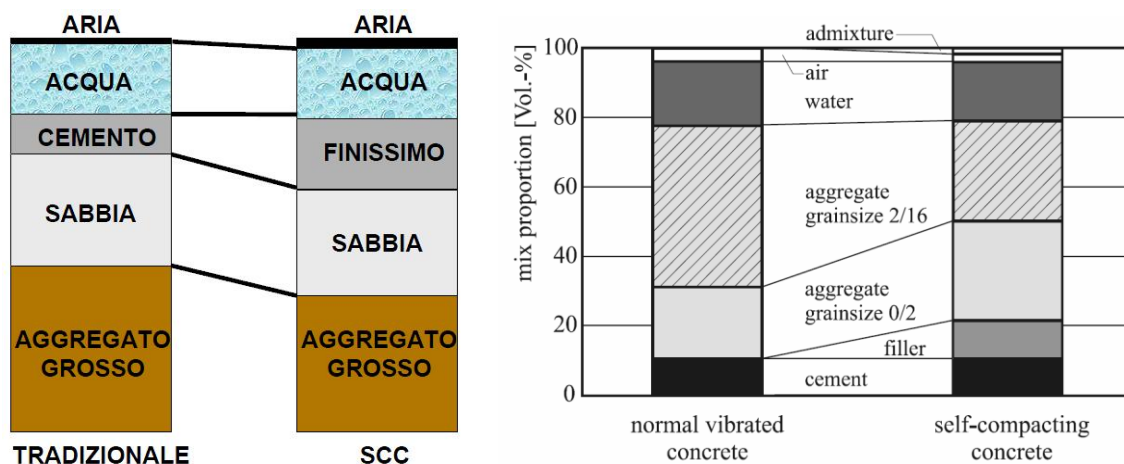
Per la produzione di un calcestruzzo autocompattante, tuttavia, è necessario associare all'utilizzo degli additivi sopramenzionati un corretto proporzionamento degli ingredienti del calcestruzzo. A questo proposito il conglomerato dal punto di vista reologico può essere schematizzato come un sistema costituito da due fasi di cui una la pasta (acqua, cemento e polveri finissime di dimensioni inferiori a 0.125 mm) costituisce il fluido



trasportatore; l'altra, invece, costituita dagli aggregati lapidei, rappresenta la fase trasportata. Pertanto, la reale possibilità di produrre un calcestruzzo autocompattante è associata alla necessità di aumentare il volume di materiale finissimo, che costituisce il fluido trasportatore, a scapito di un minor volume di aggregato e di quello grosso in particolare. Il volume di pasta di cemento in eccesso rispetto a quella necessaria per avvolgere la superficie dei granuli dell'aggregato grosso, lo strato di pasta in eccesso di

sufficiente spessore attenua le collisioni dei granuli evitando l'arresto del flusso di calcestruzzo. Una regola pratica è quella di garantire un volume di materiale finissimo compreso tra 160 e 190 l/m³ circa. Un volume così rilevante di materiale finissimo non può essere ottenuto ricorrendo all'impiego del solo cemento in quanto occorrerebbero dosaggi di legante di circa 500-600 Kg/m³ improponibili per gli inevitabili rischi di fessurazione dei getti conseguenti sia ai gradienti termici che al ritiro idraulico. Pertanto, il confezionamento di calcestruzzi autocompattanti si basa sull'utilizzo combinato di cemento e di materiale finissimo con lenta o pressoché nulla velocità di idratazione quali la cenere volante, il calcare macinato, la loppa d'altoforno e il fumo di silice.

Relativamente a queste aggiunte occorre tener presente che la cenere volante può

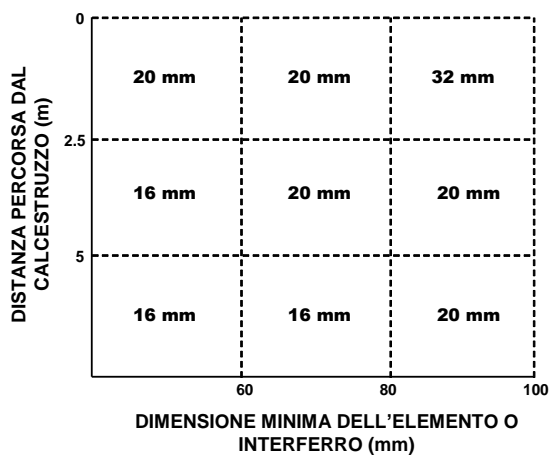


determinare un incremento della coesione e una riduzione della suscettibilità dell'impasto ad eventuali variazioni di composizione¹. Per contro, eccessivi dosaggi di cenere possono aumentare la viscosità del calcestruzzo e penalizzare, conseguentemente, la capacità di scorrimento del materiale. I filler calcarei vengono correntemente utilizzati per la produzione del calcestruzzo autocompattante. I requisiti richiesti per queste aggiunte inerti sono squisitamente di tipo granulometrico: essi debbono possedere passante a 0.125 mm di almeno il 70%. Rispetto ad altre aggiunte, le polveri di calcare offrono il vantaggio di una maggiore costanza di qualità in termini di granulometria e, quindi, consentono un più agevole controllo della richiesta d'acqua d'impasto e, conseguentemente, delle proprietà di scorrimento del calcestruzzo. Per contro, rispetto alla cenere volante, conferiscono all'impasto una minore resistenza alla segregazione. Accanto al requisito relativo al volume di finissimo ($160-190 \text{ l/m}^3$) è opportuno affiancare un ulteriore provvedimento legato al volume di acqua complessivo nel calcestruzzo il quale deve risultare compreso tra 170 e 210 litri/m^3 . Il volume di complessivo di pasta, inoltre, deve essere compreso tra 350 e 380 litri/m^3 e il rapporto in volume acqua/ finissimo² tra 0.85 e 1.10 . Questi

² Il finissimo è costituito dalla somma del cemento, delle aggiunte pozzolaniche, delle frazioni del filler calcareo e delle sabbie di dimensioni inferiori a 0.125 mm.

provvedimenti finalizzati ad ottimizzare volume e reologia della pasta debbono essere integrati da quelli relativi a limitare il volume dell’ aggregato grosso che deve risultare inferiore a 360 l/m³. Inoltre, occorrerà porre delle limitazioni anche al diametro massimo dell’aggregato che dovrà essere scelto in funzione delle caratteristiche di autocompattabilità da conseguire (Prospetto 4).

A conclusione del paragrafo in Tabella 6 vengono riassunti i principali requisiti compositazionali sopramenzionati per il confezionamento dei calcestruzzi autocompattanti.



Prospetto 4 Scelta del diametro massimo dell’aggregato in relazione alla geometria della struttura cui il calcestruzzo è destinato e alla capacità di scorrimento laterale richiesta per l’SCC.

Tabella 6 Requisiti compositazionali per il confezionamento dei calcestruzzi autocompattanti

COMPONENTE	VALORI SUGGERITI IN MASSA (Kg/m³)	VALORI SUGGERITI IN VOLUME (l/m³)
FINISSIMO	450-550	160-190
PASTA	-	350-380
ACQUA	170-210	170-210
AGGREGATO GROSSO	< 970	< 360
ACQUA/FINISSIMO	0.31-0.36	0.85-1.10
SABBIA	-	45-55% DEL VOLUME TOTALE DEGLI AGGREGATI

Le principali differenze composizionali tra calcestruzzi tradizionali superfluidi e conglomerati autocompattanti che possono essere riassunte in: un minor volume di aggregato grosso, un maggior volume di pasta, un basso rapporto acqua/finissimo, un contenuto più elevato di additivo superfluidificante (il quale viene utilizzato in percentuali simili a quelle impiegate nei calcestruzzi tradizionali, ma viene dosato rispetto alla massa del cemento e delle aggiunte), un volume di aria leggermente superiore (per il maggior volume di pasta) e un agente modificatore di viscosità.

2.10 La produzione del calcestruzzo autocompattante

Il calcestruzzo autocompattante, rispetto ai conglomerati tradizionali, presenta una maggiore dipendenza delle sue caratteristiche reologiche dalle variazioni del dosaggio degli ingredienti rispetto al valore nominale. Pertanto, la sua produzione non può che avvenire in impianti dotati di processo industrializzato certificato da un organismo terzo prevedendo, inoltre, stringenti controlli sia sulla distribuzione granulometrica degli aggregati che sul contenuto di umidità che necessariamente deve essere determinata ad ogni carico nel mescolatore. Per il minore attrito generato, i tempi di miscelazione per la produzione degli SCC risultano più lunghi rispetto a quelli richiesti per un conglomerato tradizionale. Per evitare il problema della formazione dei grumi generalmente è conveniente iniziare il mescolamento ad una consistenza più bassa (tipica dei conglomerati tradizionali) e, solo dopo aver ottenuto una efficace dispersione di tutte le particelle, procedere all'aggiunta di ulteriore acqua, dell'additivo residuo e, infine, dell'VMA. Quindi, si potrà procedere ad effettuare eventuali aggiustamenti di acqua per conseguire la consistenza finale miscelando ad un velocità di rotazione di 12-16 giri al minuto circa.

2.11 La posa in opera del calcestruzzo autocompattante e le operazioni di finitura

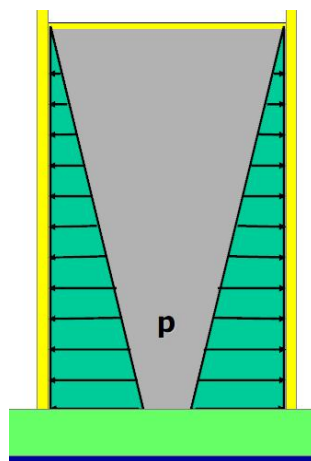
L'impiego del calcestruzzo autocompattante nella realizzazione delle strutture impone l'adozione di alcuni accorgimenti nella fase di preparazione dei casseri, della posa in opera e delle operazioni di finitura che risultano in molti casi completamente differenti rispetto a quelli richiesti per le operazioni di betonaggio da effettuarsi con i conglomerati tradizionali. Un primo aspetto riguarda la tipologia, i sistemi di controventamento e di fissaggio delle casseforme.

2.11.1 La spinta sui casseri

Durante la messa in opera del conglomerato e ad operazioni di betonaggio ultimate il calcestruzzo prima di completare la presa esercita sui casseri una spinta laterale che è funzione dei seguenti parametri fondamentali:

- le caratteristiche reologiche dell'impasto;
- la velocità di riempimento della cassaforma;
- la modalità di esecuzione del getto (dall'alto per caduta oppure per pompaggio dal basso)
- dalla eventuale vibrazione esercitata durante le operazioni di posa;
- dalla permanenza del calcestruzzo allo stato plastico (e quindi dai tempi di presa del conglomerato cementizio).

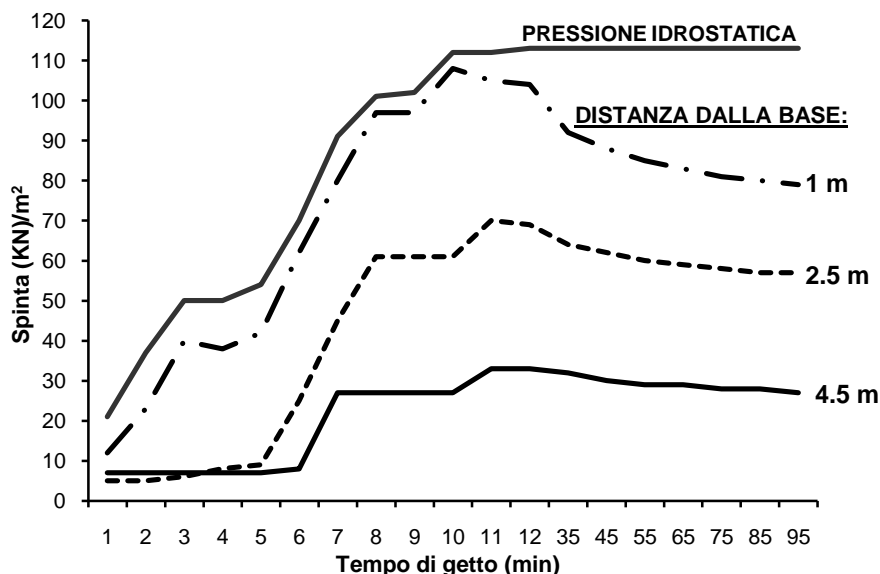
A parità di tutte le condizioni, la spinta aumenta al diminuire della coesione e della viscosità del calcestruzzo; pertanto, si intuisce come il calcestruzzo autocompattante, per la



maggiore fluidità e scorrevolezza, determini un incremento della pressione esercitata sui casseri rispetto ad un conglomerato tradizionale. Tuttavia, occorre tener presente che la maggiore spinta derivante dall'impiego del calcestruzzo autocompattante diventa significativa soltanto quando il getto viene effettuato per caduta del calcestruzzo dall'alto e quando le velocità di riempimento diventano relativamente alte ($> 4-7$ m/h). Quando la velocità di riempimento supera i 7 m/h il calcestruzzo autocompattante imprime sulle sponde dei casseri una spinta triangolare assimilabile a quella idrostatica di un fluido che possiede una massa di 2500 Kg/m^3 circa; nel maggior parte dei casi per ragioni cautelative si considera la spinta idrostatica sui casseri pari a $p = 25 \text{ KN/m}^3 * m$. Il conglomerato tradizionale, la cui velocità di posa in opera non supera, salvo casi eccezionali, i 4 m/h, per via della maggiore coesione e viscosità, esercita sulle sponde del cassero una spinta variabile all'incirca tra il 40 e 65 % di quella idrostatica a seconda della consistenza che possiede al getto (i valori più bassi sono quelli tipici di classi di consistenza S2 e quelli più elevati sono relativi a lavorabilità maggiori di 21 cm di slump). Nel caso del calcestruzzo pompato dal basso la spinta esercitata sui casseri è tipicamente di tipo idrostatico quando le velocità di riempimento superano i 10 m/h.

In definitiva, atteso che una delle motivazioni che induce le imprese a utilizzare i calcestruzzi autocompattanti è proprio quella di accelerare i lavori di esecuzione dell'opera, le velocità di riempimento dei casseri³ quando vengono impiegati gli SCC superano generalmente i 10 m/h e, pertanto, le reali pressioni indotte dal calcestruzzo sulle casseforme sono di tipo idrostatico. Ne consegue che per l'impiego di calcestruzzi autocompattanti è necessario ricorrere all'utilizzo di casseri opportunamente progettati in quanto quelli tradizionalmente destinati alla realizzazione di strutture impiegando i calcestruzzi convenzionali sono dimensionati per resistere a spinte notevolmente minori (Prospetto 5).

³ Con i calcestruzzi tradizionali non si riesce a posare a velocità superiori a 5-7 m/h.



Prospetto 5 Spinta esercitata sui casseri dal calcestruzzo autocompattante durante l'esecuzione del getto di pareti verticali con pompaggio del conglomerato dal basso verso l'alto (sonde disposte ad altezze diverse).

2.11.2. Posa in opera: altezza di caduta, distanza laterale di scorrimento e vibrazione

I calcestruzzi autocompattanti posseggono una minore tendenza alla segregazione esterna rispetto ai calcestruzzi tradizionali. Pertanto, l'altezza di caduta del conglomerato può risultare maggiore di quella massima (50 cm) prevista per i conglomerati convenzionali. Tuttavia, il calcestruzzo autocompattante, soprattutto quello caratterizzato da basse viscosità (VF1), possiede maggiore tendenza a segregare. Pertanto, è buona norma durante la posa tenere il manicotto della pompa annegato nel calcestruzzo o al massimo prevedere altezze di caduta del conglomerato non superiori a 1-2 m in relazione alla viscosità dell'SCC. Altezze di caduta di 5 m segnalate in passato come valori possibili per gli SCC in qualsiasi contesto sembrano siano assolutamente da sconsigliare. E' da tener presente, infine, che un'eccessiva altezza di caduta del conglomerato può peggiorare il facciavista delle strutture per la maggiore difficoltà ad espellere l'aria dall'impasto. Per quanto attiene, infine, allo scorrimento laterale del calcestruzzo autocompattante, laddove la logistica lo permette, è buona norma spostare il tubo getto in modo che il conglomerato debba

percorrere pochi metri lateralmente. Occorre tener presente che maggiore è la distanza percorsa e più elevato sarà il rischio di separazione degli ingredienti. Una ragionevole regola pratica è quella di non superare distanze laterali di scorrimento pari a 8-10 m circa.

I calcestruzzi autocompattanti sono progettati per poter riempire gli stampi senza vibrazione alcuna. Sottoporre comunque il conglomerato all'azione del vibratore ad immersione non migliora affatto le caratteristiche del calcestruzzo in opera, ma può, invece, accentuarne la tendenza alla segregazione, soprattutto in quegli impasti caratterizzati da bassi tempi di svuotamento al V-funnel. Si può derogare a questa regola nel caso di solette che possono essere sottoposte ad una blanda azione della staggia vibrante onde migliorarne la qualità estetica della superficie.

2.11.3. Finitura delle superfici e maturazione dei getti

A causa della minore capacità di bleeding i calcestruzzi autocompattanti possono presentare dei problemi rispetto ai calcestruzzi tradizionali in termini di finitura. La mancanza di acqua superficiale e la tendenza ad assumere un comportamento tixotropico rende questi calcestruzzi difficili da rifinire in quanto si presentano appiccicosi ed esposti, soprattutto in climi asciutti e ventilati, alla precoce formazione di croste superficiali. Per questo motivo le operazioni di finitura delle superfici debbono essere anticipate rispetto ai tempi dei calcestruzzi tradizionali.

La minore quantità di acqua che perviene sulle superfici per effetto del bleeding è responsabile di una maggiore tendenza degli autocompattanti a evidenziare quadri fessurativi per effetto del ritiro plastico. Pertanto, per questi conglomerati le operazioni di maturazione diventano indispensabili e debbono iniziare immediatamente dopo aver ultimato le operazioni di finitura superficiale.

2.11.4. Facciavista delle strutture

Nelle strutture realizzate con i conglomerati tradizionali la vibrazione, soprattutto se effettuata a parete, tende a richiamare le bolle di aria verso la sponda del cassero e a schiacciarla determinando, al disarmo, la presenza di una serie di bolle di dimensioni variabili da qualche mm a un cm circa che, sebbene non costituiscano un problema per la

durabilità dell'opera essendo profonde 1-2 mm circa, ne deturpano l'estetica. L'assenza di vibrazione conseguente all'impiego dei calcestruzzi autocompattanti farebbe intuire che questo fenomeno delle bolle superficiali dovrebbe, con questi conglomerati, attenuarsi. Le esperienze di cantiere hanno, tuttavia, confermato che l'ottenimento di un eccellente faccia-vista dipende dagli stessi parametri che influenzano quello delle strutture realizzate con i convenzionali conglomerati quali la:

- la tipologia del cassero: assorbente o meno;
- la qualità del disarmante;
- le modalità di posa in opera (getto dal basso o dall'alto).

Sebbene diventa difficile generalizzare alcune affermazioni si possono fare alcune considerazioni in merito alla qualità estetica dei getti:

- il problema delle bolle superficiali è fortemente attenuato dall'impiego di casseri assorbenti in legno o con controstampi in materiali assorbenti poggiati sulla superficie interna del cassero;
- le bolle superficiali si accentuano quando il getto viene effettuato dall'alto, all'aumentare dell'altezza di caduta e della velocità di riempimento del cassero;
- è fondamentale effettuare prove preliminari di compatibilità tra disarmante e tipo di cassero prima di accingersi alla realizzazione di strutture dove il facciavista viene ritenuta una proprietà fondamentale.

2.12 La resistenza in opera del calcestruzzo autocompattante

Uno dei principali obiettivi che ci si prefigge di conseguire con i calcestruzzi autocompattanti è quello di ottenere per il conglomerato in opera resistenza a compressione sostanzialmente prossima a quella massima raggiungibile sui provini cubici prelevati allo scarico del calcestruzzo in cantiere (massima resistenza a compressione raggiungibile atteso che il provino viene compattato a rifiuto e maturato in condizioni ottimali di temperatura e di umidità relativa).

I risultati di una indagine sperimentale condotta (*Prof. Ing. Luigi Coppola*) sottoponendo a prove di schiacciamento alcune carote (rapporto $h/d=2$) estratte da un muro in calcestruzzo gettato dal basso verso l'alto con un calcestruzzo autocompattante (CE II/A-L 42.5R,

$c=340 \text{ Kg/m}^3$, cenere volante $\approx 140 \text{ Kg/m}^3$ e $AMV=0.5 \text{ Kg/m}^3$) hanno evidenziato per la resistenza a compressione un valore medio di 30.06 N/mm^2 inferiore di appena l'8% rispetto a quello (32.8 N/mm^2) misurato su provini cilindrici (altezza/diametro=2) confezionati a bocca di betoniera e maturati in adiacenza al muro in modo da eliminare l'effetto della temperatura sui valori ottenuti. Inoltre, i valori di resistenza a compressione delle carote prelevate in punti disposti ad altezze e distanze diverse dal punto di introduzione del conglomerato nella cassaforma sono tutti compresi nell'intervallo $27.2\text{-}32.4 \text{ N/mm}^2$. I dati ottenuti mostrano, quindi, una ridotta dispersione dei risultati di resistenza a compressione e un abbattimento delle prestazioni meccaniche rispetto al provino confezionato a bocca di betoniera di gran lunga inferiore rispetto a quello massimo ammesso sia dalle Norme Tecniche per le Costruzioni che dalla pre-norma europea prEN 13791. Pertanto, si può concludere che l'utilizzo del calcestruzzo autocompattante può consentire di adottare un requisito più stringente per la resistenza caratteristica a compressione in opera $C(x/y)^*$ rispetto a quello previsto per le strutture realizzate con conglomerati di consistenza tradizionale. La prescrizione sui controlli in opera potrebbe essere così formulata:

$$C(x/y)^*_{in-opera} > 0.90 \cdot C(x/y)$$

2.13 Le proprietà dei calcestruzzi auto compattanti

La qualità della zona di transizione all'interfaccia pasta-aggregato influenza significativamente il comportamento deformativo del calcestruzzo e ne governa le modalità di collasso. I calcestruzzi autocompattanti, caratterizzati da una maggiore coesione rispetto ai conglomerati tradizionali, essendo interessati da fenomeni di bleeding interno minori, sono contraddistinti da una zona di transizione di migliore qualità e, pertanto, da una minore percentuale di difetti e di microfessurazioni rispetto ai calcestruzzi convenzionali. Conseguentemente, a seguito di questo miglioramento della qualità della microstruttura per i calcestruzzi autocompattanti ci si deve attendere sia allo stato fresco che indurito prestazioni più elevate rispetto ad un calcestruzzo convenzionale di pari rapporto a/c equivalente

2.13.1. Assestamento plastico

La riduzione del bleeding interno nei calcestruzzi autocompattanti è responsabile di una minore tendenza dell'impasto ad evidenziare fenomeni di assestamento plastico nella fase immediatamente successiva alla posa in opera.

2.13.2. Ritiro plastico

La riduzione della capacità di bleeding nei calcestruzzi autocompattanti è responsabile di un maggior ritiro plastico rispetto ai conglomerati tradizionali. I dati disponibili in letteratura indicano che il ritiro plastico degli SCC è all'incirca il doppio di quello dei conglomerati tradizionali. Questo effetto sembra sia da ascrivere al maggior rapporto acqua/polveri dell'autocompattante e a tempi di presa più lunghi, determinati dal maggior dosaggio di additivo. I risultati sperimentali giustificano la necessità evidenziata al precedente paragrafo di procedere, immediatamente dopo le operazioni di finitura, alla maturazione umida delle superfici non cassate.

2.13.3. Resistenza meccanica a compressione

Prove sperimentali condotte su calcestruzzi autocompattanti e tradizionali hanno messo in evidenza che gli SCC posseggono maggiori resistenze a compressione rispetto ad un impasto convenzionale di pari rapporto a/c. Questo miglioramento sembra da ascrivere ad una zona di transizione meno porosa e priva di fessure. Inoltre, è da evidenziare come i calcestruzzi con filler calcareo presentino, rispetto a quelli con cenere volante di pari a/c, resistenze a compressione maggiori alle brevi stagionature. Questo effetto del filler calcareo sembra sia da ascrivere ad un incremento della cristallinità dell'ettringite e a una riduzione del periodo dormiente con conseguente accelerazione dei processi di presa e di indurimento. Questi dati sono confermati dal fatto che l'incremento di temperatura in condizioni adiabatiche è sistematicamente più alto nei calcestruzzi confezionati con filler calcareo rispetto a quelli prodotti ricorrendo ad aggiunte pozzolaniche quali la cenere volante.

2.13.4. Resistenza a trazione

Il miglioramento della qualità della zona di transizione all'interfaccia pasta-aggregato sembra, inoltre, essere responsabile nei calcestruzzi autocompattanti di un limitato incremento di resistenza a trazione rispetto ad un conglomerato convenzionale di pari resistenza a compressione.

2.13.5. Modulo elastico

A causa del minor volume di aggregato grosso il calcestruzzo autocompattante possiede moduli di elasticità a compressione inferiori di quelli evidenziati da un conglomerato tradizionale di pari resistenza meccanica a compressione. Pertanto, in base ai valori di resistenza a trazione e di modulo elastico si può affermare che i calcestruzzi autocompattanti presentano una minore tendenza alla fessurazione di un conglomerato tradizionale di pari classe di resistenza caratteristica a compressione.

2.13.6. Aderenza acciaio-calcestruzzo

Il miglioramento della zona di transizione all'interfaccia calcestruzzo armatura è responsabile di un incremento delle tensioni di aderenza valutabile all'incirca tra il 15 e il 40% rispetto a quelle dei conglomerati tradizionali.

2.13.7. Durabilità

A pari rapporto a/c (0.40) gli autocompattanti presentano un minor coefficiente di diffusione dei gas (9.8 contro $13.6 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2/\text{s}$). Analoghi valori sono stati ottenuti per calcestruzzi con a/c pari a 0.50 relativamente al coefficiente di diffusione dell'ossigeno (0.6 contro $1.5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2/\text{s}$).

Il coefficiente di diffusione del cloruro diminuisce negli SCC rispetto ai calcestruzzi convenzionali di pari rapporto a/c (16.1 contro $19.2 \text{ m}^2/\text{s}$; rapporto a/c = 0.40).

La resistenza ai cicli di gelo-disgelo rimane sostanzialmente invariata negli SCC rispetto ad un calcestruzzo convenzionale purché si provveda nel confezionamento ad inglobare un volume minimo di aria mediante gli additivi aeranti e si utilizzino aggregati non gelivi.

La scarsa compattazione dello strato superficiale, dovuta a difficoltà di vibrazione negli stretti spazi tra la cassatura e le barre di armatura o altri inserti (ad es. guaine per post-tensione), è stata riconosciuta come il fattore chiave della scarsa durabilità delle strutture di calcestruzzo armato esposte ad ambienti aggressivi. La ricerca di una soluzione a questo problema è stata una delle principali ragioni dello sviluppo originale del SCC in Giappone.

Il calcestruzzo vibrato tradizionale è soggetto a compattazione attraverso la vibrazione (o costipamento), considerati come un processo discontinuo. Nel caso della vibrazione interna, anche se correttamente eseguita, il volume del calcestruzzo nell'area di influenza del vibratore non riceve la stessa energia di compattazione. Analogamente, nel caso della vibrazione esterna, la compattazione risultante è essenzialmente eterogenea, a seconda della distanza dalla sorgente della vibrazione. In seguito alla vibrazione si ottiene, quindi, un calcestruzzo dalla struttura non omogeneamente compattata, che quindi presenterà diverse permeabilità facilitando l'ingresso di alcune sostanze aggressive. Naturalmente, le conseguenze di una non adeguata vibrazione (vespai, segregazione, essudazione, ecc)

hanno un impatto negativo molto più forte sulla permeabilità e di conseguenza sulla durabilità. Il calcestruzzo autocompattante dalle giuste proprietà sarà esente da questi effetti secondari e costituirà un materiale di permeabilità bassa e uniforme, che offrirà meno punti deboli per l'azione deleteria dell'ambiente, e di conseguenza una migliore durabilità. Il paragone della permeabilità castra il calcestruzzo autocompattante e quello normale vibrato dipenderà dalla selezione dei materiali e dal rapporto acqua/cemento o acqua/legante effettivo. Esistono metodi di prova, normalizzati a livello nazionale oppure consigliati da RILEM, per misurare la permeabilità del calcestruzzo, in laboratorio e in situ, come indicatori della durabilità. La EN 1992-1 e la EN 206-1 tengono conto della durabilità specificando classi di esposizione ambientale che portano all'introduzione di valori limiti per la composizione del calcestruzzo e dei copriferri minimi .

2.13.8 Ritiro idraulico

Il ritiro idraulico dei calcestruzzi autocompattanti dipende dagli stessi fattori compositivi che influenzano la contrazione dimensionale dei conglomerati tradizionali (rapporto a/c e volume di pasta di cemento equivalente rispetto al volume complessivo del calcestruzzo). Pertanto, si possono fare le seguenti considerazioni:

- a pari rapporto a/c, pari dosaggio di acqua di impasto e di cemento del calcestruzzo convenzionale gli SCC mostrano valori di ritiro sostanzialmente coincidenti o di poco superiori rispetto a quelli del conglomerato tradizionale indipendentemente dal quantitativo e dalla natura dell'aggiunta minerale utilizzata: filler calcareo o cenere volante. Relativamente a quest'ultima aggiunta i risultati sembrano indicare che il beneficio derivante dalla riduzione del rapporto a/c equivalente sia controbilanciato dall'effetto negativo dovuto all'aumento del volume di pasta legante esposto alla contrazione dimensionale;
- a pari rapporto a/c ma con un dosaggio di acqua e conseguentemente di cemento, maggiore di quelli del conglomerato tradizionale il calcestruzzo autocompattante mostra valori di ritiro significativamente maggiori. Questo risultato è da ascrivere

all'aumento del volume di pasta di cemento interessata dalla contrazione dimensionale.

-

2.14 Le prestazioni degli SCC: vantaggi e benefici

Il calcestruzzo autocompattante presenta specifiche caratteristiche sia allo stato fresco sia allo stato indurito.

Le prestazioni allo stato fresco sono:

- l'eccellente fluidità che permette al materiale di riempire facilmente le casseforme senza alcun intervento esterno delle maestranze con le apparecchiature per la vibrazione;
- la possibilità di passare attraverso i ferri d'armatura anche quando la loro densità è molto alta;
- la resistenza alla segregazione che permette di avere un getto omogeneo, monolitico e compatto.

Le prestazioni allo stato indurito sono:

- resistenza caratteristica coerente con la classe di esposizione ambientale prescritta;
- non necessita di finiture;
- migliora la faccia a vista delle strutture.

Da tali prestazioni è possibile ottenere sia da parte delle imprese esecutrici dei lavori che per il committente dei vantaggi e benefici.

Per l' **impresa** si avranno:

- **Vantaggi**

- Manodopera ridotta
- Nessun operazione di vibrazione e costipazione del calcestruzzo
- Nessuna operazione di finitura e stuccatura a getto avvenuto

- Riempimento completo ed omogeneo delle casseforme anche con presenza di ferri d'armatura
- **Benefici**
 - Riduzione dei tempi di posa
 - Riduzione dei costi di costipazione
 - Rispetto delle prescrizioni di progetto
 - Riduzione dell'inquinamento
 - Miglioramento delle condizioni di salute e sicurezza (nessuna operazione di vibratura e minor rumore)

Per il **committente** si avranno:

- **Vantaggi**
 - Certezza del rispetto delle prescrizioni di progetto
 - Rispetto delle norme di sicurezza
- **Benefici**
 - Minori costi di manutenzione dell'opera finita
 - Incremento della vita di servizio
 - Compatibilità con criteri di rispetto dell'ambiente e di sicurezza dei cantieri
 - Qualità estetica dell'opera
 - Libertà di progettazione architettonica

2.15 Le prescrizioni di capitolato per il calcestruzzo autocompattante

Il procedimento di Concrete Tender Design può essere esteso ai calcestruzzi autocompattanti avendo l'accortezza di introdurre alcune modifiche relativamente:

- **al produttore:** Per la maggiore dipendenza delle proprietà reologiche dei calcestruzzi autocompattanti dalle variazioni di dosaggio degli ingredienti rispetto ai valori nominali, la produzione degli SCC deve essere effettuata in impianti dotati di processo industrializzato certificato da un organismo terzo;

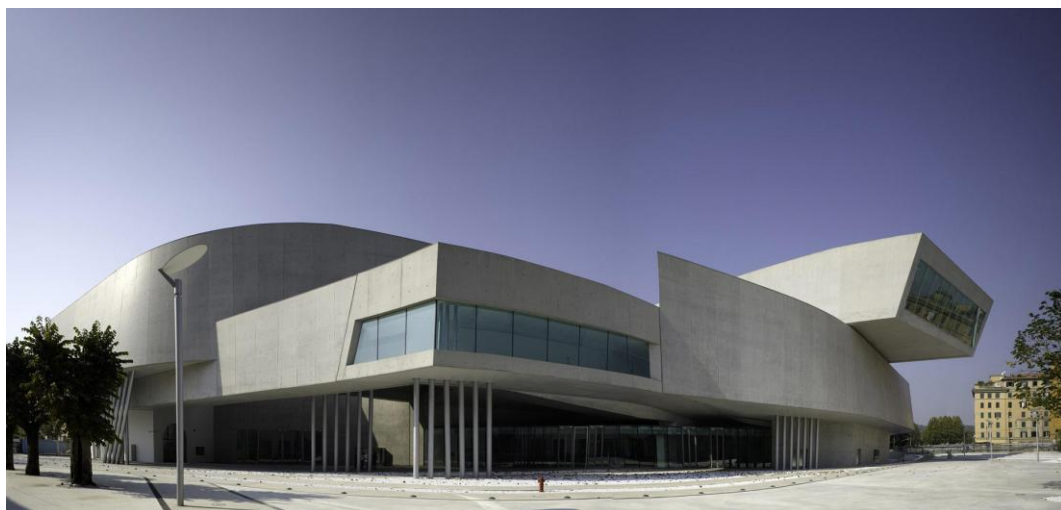
- ***agli ingredienti***: Rispetto ai conglomerati tradizionali occorre prevedere l'impiego di agenti modificatori di viscosità e obbligatoriamente delle aggiunte minerali di natura inerte (di tipo I in accordo alla EN 206-1) oppure pozzolanica. Per i motivi precedentemente esposti tra le aggiunte pozzolaniche è quasi esclusivamente la cenere volante ad essere impiegata per questo tipo di conglomerati. Per essa si richiede la conformità ai requisiti specificati dalla norma EN 450;
- ***alla dimensione massima dell'aggregato***: essa verrà scelta non solo in base alle specifiche richieste per la realizzazione delle strutture in calcestruzzo ordinario (dimensione minima della sezione, interfero minimo, copriferro, diametro delle barre e protezione delle armature dall'incendio) ma dovrà tener conto anche delle caratteristiche reologiche che si debbono conseguire per gli SCC. In particolare, si rammenta come le classi a maggiore scorrimento (SF2 e SF3) richiedono di impiegare pezzature massime per l'aggregato non superiori a 20 e 16 mm rispettivamente;
- ***alle proprietà reologiche del calcestruzzo***: queste ultime debbono essere individuate attraverso il valore dello slump-flow, del tempo di svuotamento al V-funnel, della capacità di attraversamento e della resistenza alla segregazione;
- ***alla resistenza a compressione caratteristica del calcestruzzo in opera***: Alla luce della minore dipendenza attesa per le prestazioni degli SCC in opera rispetto alla qualità dell'esecuzione del getto è opportuno rendere più stringente il requisito relativo alla resistenza attuale rispetto a quello fissato per le strutture realizzate con i conglomerati tradizionali. Pertanto, si consiglia di specificare che la resistenza caratteristica in opera (valutata su carote $h/d=1$) risulti almeno pari al 90% del valore misurato sui provini cubici prelevati a "bocca di betoniera" alla consegna del conglomerato in cantiere.

2.16 Campi di impiego degli SCC

Nel settore delle nuove costruzioni i calcestruzzi autocompattanti trovano impiego nella realizzazione di strutture a sviluppo verticale di geometrie particolarmente complesse o quando l'estetica (facciavista) acquista una rilevanza predominante.

Il calcestruzzo autocompattante grazie alla sua elevata deformabilità infatti consente la realizzazione di strutture anche a sviluppo curvilineo e migliora il grado di finitura in corrispondenza dei punti singolari rappresentati da variazioni di sezione, dalla presenza di aperture o rientranze.

In linea di massima rispettando gli accorgimenti progettuali ed esecutivi richiesti per getti facciavista l'impiego di un conglomerato autocompattante consente la realizzazione di manufatti che dal punto di vista estetico presentano una migliore finitura rispetto a quella conseguibile con un conglomerato superfluido.



Museo Maxxi (Zaha Hadid)

I calcestruzzi autocompattanti vengono impiegati anche nel settore dei pavimenti e delle platee di fondazione in quanto il loro vantaggio consiste nella possibilità di accelerare i tempi di esecuzione delle strutture oltre che di ridurre la manodopera, grazie alla eliminazione dei processi



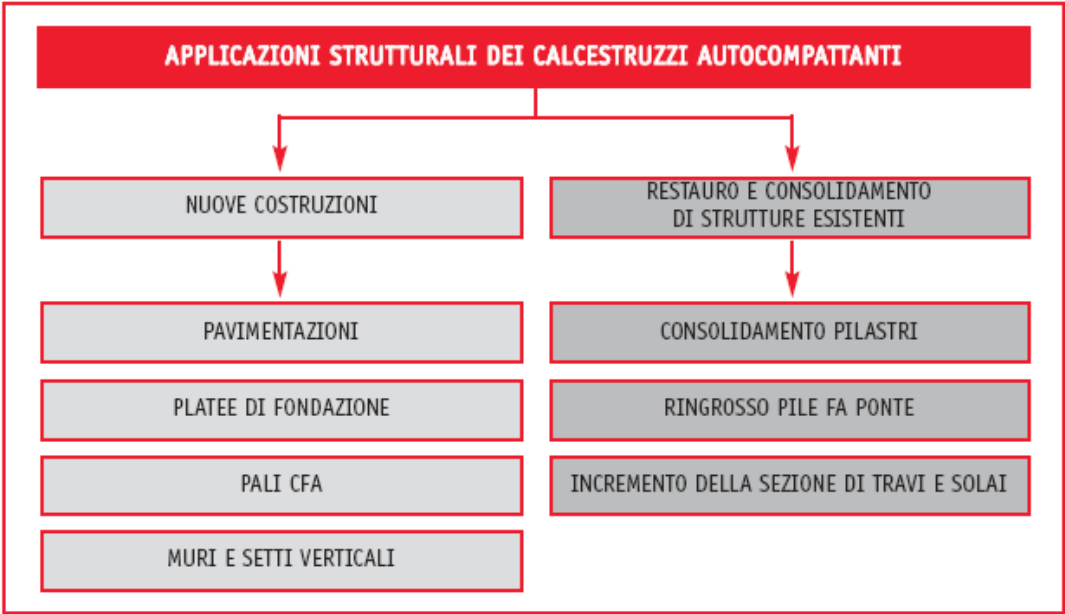
di vibrazione. I conglomerati autocompattanti, inoltre, si prestano a realizzare strutture di fondazione a platea in quanto in molti casi la percentuale di armatura nella sezione risulta così rilevante da impedire l'accesso dell'ago del vibratore.

I calcestruzzi autocompattanti hanno trovato larga applicazione anche nella realizzazione dei pali trivellati di tipo Augher (Continuous Flight Augher: CFA). Per queste strutture infatti gli SCC grazie alla bassa viscosità consentono a trivellazione avvenuta del terreno di procedere al getto del calcestruzzo per il riempimento dello scavo e, successivamente, all'affondamento della gabbia di armatura. Questa operazione ovviamente sarebbe di impossibile o quantomeno difficile attuazione impiegando un calcestruzzo a consistenza S5 o S4.

Nel settore del ripristino di strutture esistenti sono numerose le applicazioni che si registrano ricorrendo all'impiego dei calcestruzzi autocompattanti per il ringrosso delle sezioni originarie soprattutto di elementi verticali. I vantaggi derivanti dall'utilizzo degli SCC in questo contesto derivano dal fatto che a causa del ridotto spessore del ringrosso è praticamente impossibile procedere alla compattazione di un calcestruzzo tradizionale superfluido. Inoltre, la elevata fluidità degli SCC consente anche di poter gettare attraverso spazi angusti come avviene quando, nel ringrosso di un pilastro, la posa in opera deve avvenire dall'estradosso del solaio attraverso



i fori realizzati nelle travi o nelle pignatte di laterizio.



3. GLI INGREDIENTI DEL CALCESTRUZZO SCC: CEMENTO, ACQUA D'IMPASTO, AGGREGATI, ADDITIVO E AGGIUNTE MINERALI.

3.1 CEMENTO

Se è vero che è impossibile produrre un calcestruzzo in assenza di uno dei suoi tre costituenti principali-acqua, cemento, ed aggregati lapidei – è anche vero che il **cemento** è il cuore del calcestruzzo. Esso gioca il ruolo del protagonista al punto che le opere in calcestruzzo sono spesso chiamate, sia pure impropriamente, “opere in cemento”. Nella sua essenza il cemento è una polvere che, mescolata con acqua in proporzione 3:1, è in grado di produrre una massa (**pasta**) facilmente modellabile che nel giro di qualche ora si rapprende perdendo la sua iniziale plasticità (**presa**) e successivamente, nel giro di un giorno, assume la rigidità tipica di una pietra naturale ed è capace di resistere ad apprezzabili sollecitazioni meccaniche (**indurimento**).

3.1.1. La produzione del cemento Portland

Il cemento è il legante idraulico attualmente più diffuso al mondo; la produzione di questo materiale nel 2003 ha sfiorato i due miliardi di tonnellate. Il cemento Portland si ottiene dalla macinazione, in presenza di una o più forme di solfato di calcio, del clinker ottenuto per

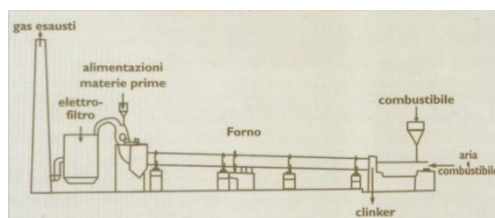


Figura 3.1 Schematizzazione della cottura del clinker



Figura 3.2 Clinker all'uscita del forno di cottura

cottura di un insieme di materie prime (costituite principalmente da calcari, argille, sabbie e ceneri pirite) in forni rotanti, alla

temperatura di 1300-1450°C.

I cementi commercialmente



Figura 3.3 Sfere di clinker all'interno del mulino.

disponibili sul mercato sono costituiti da miscele di cemento Portland con diversi materiali

quali pozzolane naturali o di origine industriale, la cenere volante, il fumo di silice, la loppa d'altoforno, lo scisto calcinato e di calcare. Le materie prime per la produzione del clinker del cemento Portland contengono in opportune proporzioni silice, ossidi di alluminio, ossidi di calcio e ferro, e, sebbene in piccole quantità, anche ossido di magnesio e di zinco, ossidi di piombo, fosfati e alcali. In particolare, le fonti di calce sono costituite da pietre calcaree, la silice viene apportata da materiali argillosi e il ferro viene fornito da materiali ferrosi e da pirite. La produzione del clinker di cemento Portland inizia con una prima macinazione delle materie prime opportunamente dosate e miscelate. La polvere così ottenuta, denominata "farina", viene introdotta nella estremità superiore di un forno rotante (fig. 3.1), costituito da cilindro leggermente inclinato sull'orizzontale internamente rivestito con un materiale refrattario, e avanza in controcorrente rispetto al flusso di calore prodotto per combustione all'estremità inferiore del cilindro stesso. Durante l'avanzamento nel forno la farina subisce una serie di trasformazioni chimiche che consistono sostanzialmente nell'espulsione dell'acqua libera (che avviene a 100°C), seguita dalla perdita dell'acqua contenuta nei materiali argillosi (nella zona di preriscaldamento del forno, nell'intervallo di temperatura compreso tra 100 e 750°C circa). Alla temperatura di 750-1000°C circa si ha la *decarbonatazione* del calcare e, infine, nella zona della cottura vera e propria, dove la temperatura del forno raggiunge i 1450°C, si manifesta una parziale fusione della miscela (*clinkerizzazione*) che conduce alla formazione del clinker costituito da silicati di calcio. Successivamente la miscela inizia a raffreddarsi (alla temperatura di circa 1350°C) con una parziale cristallizzazione della massa fusa e con la formazione degli alluminati di calcio. Il materiale ottenuto dal processo di cottura, ulteriormente raffreddato da una corrente d'aria fredda, si presenta in forma di particelle sferiche di diametro variabile da circa 3 a 25mm (fig. 3.2) che vengono macinate, unitamente a qualche per cento di solfati e di additivi coadiuvanti di macinazione (costituiti da trietanolammina, ligninsolfonato ecc.), in appositi mulini a sfera (fig. 3.3) fino ad ottenere una polvere della

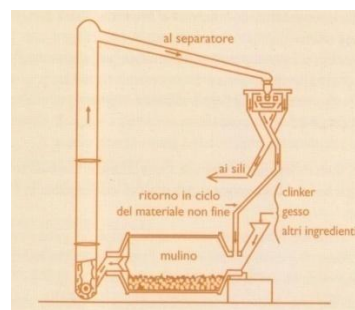


Figura 3.4 Schema ciclo di macinazione nella produzione del cemento Portland.

finezza desiderata denominata come “**cemento Portland**”, (costituita da particelle di dimensioni a 100 μm), che verrà in seguito direzionata negli appositi sili di stoccaggio (fig 3.4).

3.1.2. I costituenti mineralogici del cemento Portland

I costituenti mineralogici principali del cemento Portland sono rappresentati dal silicato tricalcico (**C3S**), dal silicato bicalcico (**C2S**), dall'alluminato tricalcico (**C3A**) e dalla fase ferrica cioè dall'alluminato tetracalcico (**C4AF**). Questi costituenti nei clinker commerciali non esistono nella forma pura. Infatti, solitamente il C3S è costituito da una soluzione solida che contiene Mg e Al che prende il nome di “**alite**”; il C2S si presenta nel clinker soltanto nella forma beta, denominata “**belite**” e contiene Al, Mg e ossido di potassio; la fase ferrica, infine, è una soluzione solida di composizione variabile da C2F a C6A2F. Tra i costituenti mineralogici del clinker sicuramente i più importanti sono i silicati, sia perché presenti in percentuale maggiori (dal 75 all'80%), sia perché sono responsabili delle prestazioni meccaniche della pasta di cemento indurita alle quali, invece, non contribuiscono gli alluminati.

3.1.2.1. L'idratazione dei silicati

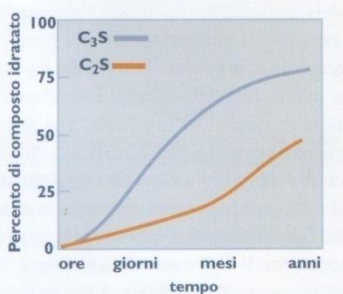


Figura 3.5 Schematizzazione del grado di idratazione dei silicati in funzione del tempo.

Se il cemento fosse costituito da solo C3S (alite) o C2S (belite) si registrerebbe un perfetto parallelismo tra il decorso nel tempo della

reazione chimica di idratazione (fig 3.5) e quello dello sviluppo

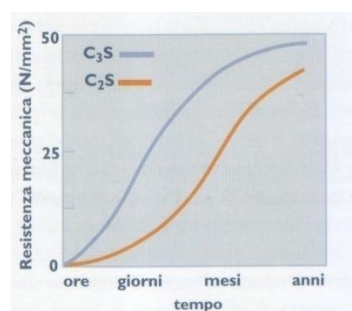


Figura 3.6 Schematizzazione della resistenza meccanica a compressione dei silicati in funzione del tempo.

della resistenza meccanica (fig 3.6). Si può notare che il C3S, rispetto al C2S è più rapido sia nel reagire con l'acqua (fig 3.5) sia nello sviluppare la corrispondente resistenza meccanica (fig 3.6). Tuttavia, per entrambi i silicati si registrano una reazione di

idratazione ed una resistenza meccanica trascurabili durante le prime ore, così come si registra una pressoché identica resistenza meccanica elevata alle lunghissime stagionature (anni). Naturalmente, il diverso comportamento (chimico e prestazionale) del C3S e del C2S a 1 giorno, a 1 settimana ed a 1 mese dal getto comporta una sostanziale differenza dal punto di vista pratico, ove si pensi all'importanza della resistenza meccanica a pochi giorni dal getto o a 28 giorni per la determinazione della resistenza caratteristica sulla quale si basano convenzionalmente i dati progettuali. Da ciò deriva che, in generale, in cemento Portland la quantità di C3S è molto maggiore rispetto a quella del C2S (circa 3:1), salvo in casi eccezionali (*cemento belitico*) in cui le prestazioni meccaniche a 1 a 28 giorni non sono così importanti (es. nelle dighe dove si caratterizza il calcestruzzo a 90-180 giorni) o nel contempo esistono altre esigenze (ridotto sviluppo di calore) per preferire un cemento con maggior numero in C2S che con C3S. Nella figura 3.5 è riportata la percentuale di C3S o C2S che ha reagito con l'acqua in funzione del tempo, ma in entrambi i casi si formano due tipologie di prodotto : un silicato di calcio idrato **C-S-H** e l'idrossido di calcio $Ca(OH)_2$, indicato anche con la sigla **CH** :

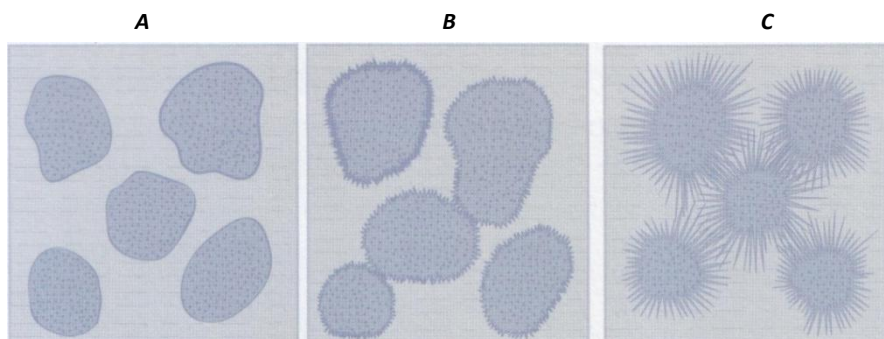
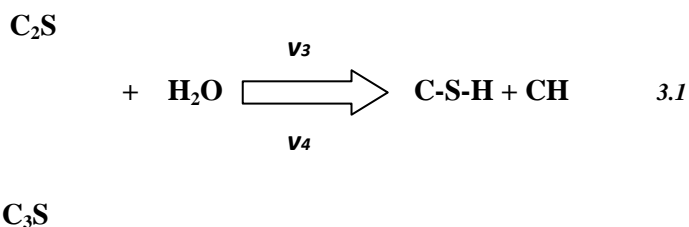


Figura 3.7 Idratazione schematica del C_3S o C_2S .

In realtà il processo di idratazione **3.1** viene con una velocità (v_3) minore se si tratta del C2S, e maggiore ($v_4 > v_3$) se si tratta del C3S. Tuttavia, la reazione chimica **3.1**, da sola, non è in grado di spiegare perché una pasta di C3S o di C2S si trasforma gradualmente dalla iniziale massa plastica ad un materiale rigido e duro come una pietra. In realtà, tra i due prodotti della reazione, solo il C-S-H è determinante per l'indurimento, mentre la calce contribuisce in modo trascurabile a questo processo. In linea di massima,



Figura 3.8 Pasta di C_3S al momento della presa (a sinistra) e dell'indurimento (a destra).

inoltre in una pasta di cemento completamente idratata il C-S-H- rappresenta circa il 60-70% dei prodotti solidi, mentre l'idrossido di calcio varia dal 18 al 25%. Con il progredire della reazione **3.1** le fibre di C-S-H formatesi sui granuli di C3S o di C2S adiacenti, prima si toccano e poi si intrecciano tra loro. Nella

figura 3.7 sono schematicamente illustrati tre stadi del processo di idratazione: subito dopo il mescolamento quando la reazione non è ancora sostanzialmente partita ed il sistema è relativamente fluido (**A**); all'inizio della presa quando le fibre cominciano a toccarsi tra loro ed il sistema perde la sua plasticità iniziale (**B**); l'indurimento in atto quando le fibre, allungatesi per la progressiva idratazione dei silicati, si intrecciano tra loro e provocano l'irrigidimento del sistema (**C**). Le microfotografie della figura 3.7 mostrano la situazione di una pasta di C3S, al momento della presa e a indurimento avvenuto, così come è rilevabile con l'ausilio del microscopio elettronico a scansione. Inoltre si può notare nelle foto (figura 3.8) come tra le fibre esistano micro-cavità diffuse, denominate “**pori capillari**” che influiscono negativamente tanto sulla resistenza meccanica quanto sulla durabilità del materiale.

3.1.2.2. L'idratazione degli alluminati

Il C3A ed il C4AF (necessari per diminuire la temperatura di cottura del clinker e rendere ragionevolmente basso costo per la produzione del cemento) giocano un ruolo determinante nelle prime ore di reazione tra acqua e cemento:

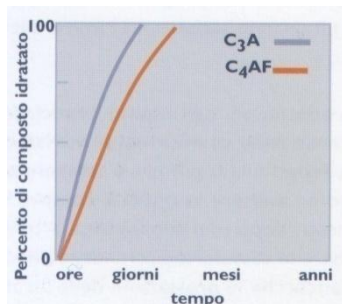
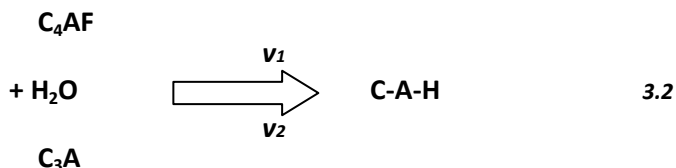


Figura 3.9 Schematizzazione del grado di idratazione degli alluminati in funzione del tempo.

Dove *C-A-H* non è una vera e propria formula chimica, ma è la generica sigla che rappresenta una famiglia di prodotti di

idratazione degli alluminati (*Calcium-Aluminate-HYdrated*).

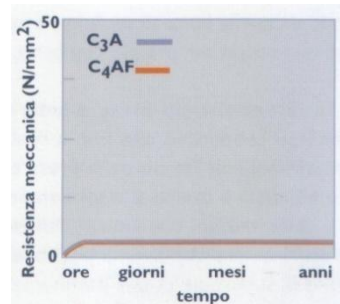
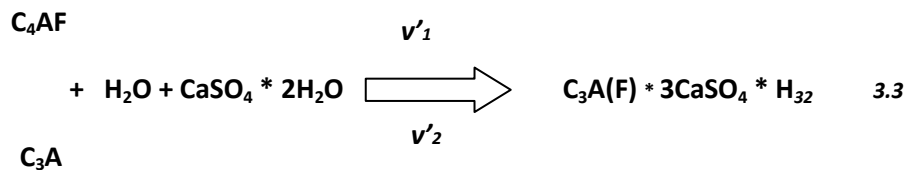


Figura 3.10 Schematizzazione della resistenza meccanica a compressione degli alluminati in funzione del tempo.

Il C_4AF e soprattutto il C_3A reagiscono rapidamente con l'acqua (fig.3.9) senza tuttavia contribuire significativamente allo sviluppo della resistenza meccanica se si accentua un rapido ma piccolo incremento durante le prime ore (fig.3.10). In sostanza alla rapida reazione degli alluminati con acqua (a velocità v_1 per il C_4AF e v_2 per il C_3A) si accompagna una immediata perdita di plasticità (*presa rapida*), senza un rilevante incremento della resistenza meccanica (fig.3.10). Ciò dipende dalla morfologia dei cristalli di *C-A-H*, prevalentemente basata sulla presenza di lamine esagonali o cristalli cubici, e quindi poco favorevole, come avviene invece per i prodotti fibrosi *C-S-H*, allo sviluppo della resistenza meccanica.

3.1.2.3. Il ruolo del gesso nella presa del cemento

Per ovviare all'inconveniente della presa rapida (< 60 min) che comporta l'impossibilità a trasportare e gettare il calcestruzzo fresco entro tempi ragionevolmente lunghi, si ricorre all'aggiunta del gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) o dell'anidride (CaSO_4) che hanno la specifica funzione di rallentare la velocità di idratazione degli alluminati rispetto a quella di processo:



Nel processo di idratazione 3.3, la presenza di gesso o anidride, come **regolatore della presa**, modifica non solo la velocità di reazione degli alluminati rispetto al processo 3.2 ($v'_1 < v_1$; $v'_2 < v_2$), ma anche il prodotto della reazione: **ettringite** ($\text{C}_3\text{A}(\text{F}) \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_{32}$) anziché C-A-H. L'ettringite che si forma durante le

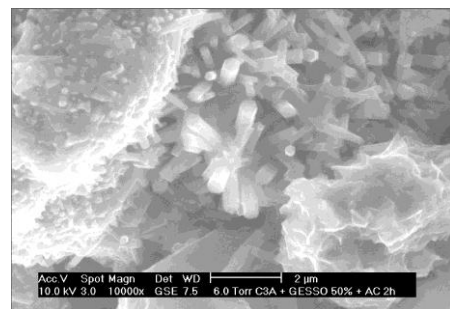


Figura 3.11 Formazione di ettringite primaria

prime ore di idratazione degli alluminati nel cemento è detta “**primaria**” (fig.3.11), per distinguerla da quella “**secondaria**” che si può formare successivamente in talune sfavorevoli circostanze, ad esempio dall’attacco dei solfati. La formazione di ettringite “primaria” ritarda l’idratazione degli alluminati (eliminando l’inconveniente della presa rapida ed instaurando la presa normale) in quanto si deposita sulla superficie del C3A e del C4AF in forma di cristalli che impediscono temporaneamente il contatto dell’acqua con il C3A e del C4AF. In assenza di gesso, invece si forma immediatamente il C-A-H in forma di prodotti laminari che, agendo da “ponti” tra le particelle di clinker, provocano una rapida perdita di plasticità (**presa rapida**). La quantità di gesso che occorre per regolare la presa del cemento è vincolata in tutte le normative del mondo da un limite circa il 7-8%. Infatti un eccesso di gesso e quindi di ettringite secondo il processo 3.3 potrebbe comportare indesiderati fenomeni fessurativi per l’azione espansiva che accompagna la formazione di ettringite. Di fatto la quantità di gesso effettivamente impiegata viene individuata sulla base di due fattori: da una parte, occorre che il gesso ritardi la presa del cemento, dall’altra, la morfologia fibrosa dell’ettringite contribuisce, molto più del C-A-H, allo sviluppo soprattutto iniziale della resistenza meccanica e pertanto la resistenza meccanica del cemento Portland è maggiore di quella del corrispondente clinker, purché l’aggiunta di gesso rimanga al di sotto dei

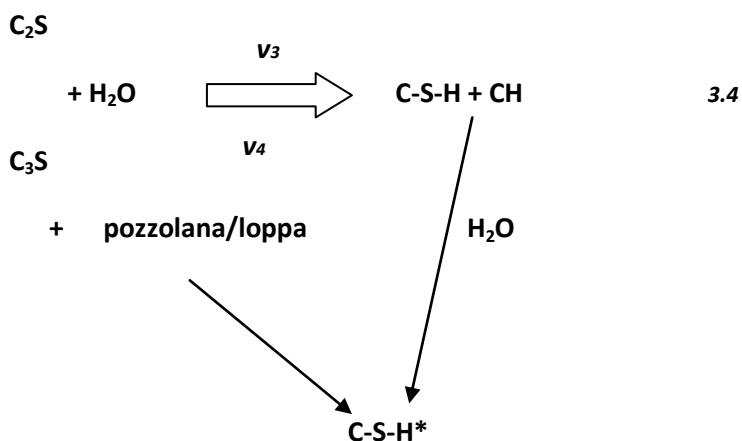
vincoli percentuali sopra menzionati per impedire l'espansione dirompente del calcestruzzo.

3.1.2.4. Il ruolo della calce nel cemento

Sebbene la calce, prodotta per idratazione dei silicati secondo la reazione 3.1 non contribuisca di per sé allo sviluppo della resistenza meccanica per la sua morfologia non-fibrosa, tuttavia essa gioca un ruolo altamente positivo da due altri punti di vista:

- **produzione dei cementi pozzolanici e d'altoforno;**
- **protezione dei ferri di armatura dalla corrosione;**

Il primo aspetto riguarda la possibilità di far contribuire anche la calce al processo di indurimento mediante l'aggiunta di pozzolana o loppa d'altoforno. Quest'ultima, e ancor più la pozzolana, sono caratterizzate dalla presenza di silice (amorfa) capace di reagire con la calce, prodotta per idratazione dei silicati, e di formare ulteriore C-S-H:



Il C-S-H* formatosi per la reazione pozzolanica (e qui contraddistinto con un asterisco) è cronologicamente "secondario", rispetto a quello primario (C-S-H) che si produce direttamente nell'idratazione dei silicati. Esso si forma, cioè successivamente, a tempi più lunghi, perché la reazione della pozzolana o della loppa con la calce 3.1 è più lenta del processo di idratazione 3.4, ma anche perché la sua formazione richiede che prima si accumuli un po' di calce attraverso la reazione 3.1. A seguito della duplice formazione di C-S-H (primario) e di C-S-H* (secondario) in una pasta di cemento pozzolanico o

d'altoforno stagionata a lungo, il sistema risulta più ricco in materiale fibroso e quindi meno poroso rispetto ad una pasta di cemento Portland a parità di rapporto a/c .

Il secondo aspetto, che riguarda la protezione dei ferri di armatura, si basa sulla osservazione che in un ambiente basico, come quello che si produce nell'acqua satura di calce che riempie i pori capillari ($pH > 12,5$), il ferro risulta ricoperto da un film di ossido ferrico denso e compatto (*passivazione*) che lo protegge dalla corrosione (produzione di ruggine in presenza di umidità e ossigeno). Quando per effetto della carbonatazione (neutralizzazione della calce di idratazione da parte della CO_2 penetrata dall'aria all'interno del calcestruzzo), il CH è completamente trasformato in $CaCO_3$, il pH scende al di sotto di 9 e viene a mancare l'ambiente fortemente basico indispensabile alla condizione della passivazione dei ferri. Da questo punto di vista, i cementi pozzolanici e d'altoforno che perdono progressivamente la calce per effetto della reazione pozzolanica e produzione di C-S-H* secondario secondo la reazione 3.4 sono potenzialmente più a rischio perché gli effetti della reazione pozzolanica si sommano a quelli della carbonatazione, favoriscono la scomparsa della calce e quindi la depassivazione dei ferri d'armatura. In realtà a parte i casi in cui si adotti un elevato rapporto a/c (>60) anche i cementi pozzolanici e d'altoforno si comportano molto bene nella protezione dei ferri dalla corrosione promossa dalla carbonatazione. Ciò dipende sostanzialmente da due situazioni entrambe favorevoli alla conservazione dello strato passivante dei ferri:

- a) la maggiore produzione di C-S-H (primario e secondario) nei cementi pozzolanici e d'altoforno favorisce la formazione di una matrice cementizia meno porosa e quindi meno penetrabile dalla CO_2 ;
- b) per quanto la calce di idratazione reagisca con la pozzolana o la loppa secondo lo schema della reazione 3.4, ne rimane sempre una piccola quantità sufficiente a saturare egualmente la soluzione acquosa che riempie i pori capillari; infatti la solubilità della calce in acqua è di circa 1,5 g/l, e pertanto è sufficiente pochissimo CH per mantenere satura l'acqua residua che riempie i pori capillari.

3.1.3. I cementi comuni e la norma UNI EN 197-1

Come anticipato nei precedenti paragrafi, i cementi disponibili in commercio sono principalmente miscele di cemento Portland con vari materiali (tra cui pozzolane, pozzolane a comportamento idraulico e aggiunte inerti); quelli costituiti

Tabella 3.1 Requisiti composizionali per i cementi comuni secondo il prospetto 1 della UNI – EN 197-1:

Tipi principali	Denominazione dei 27 prodotti (tipi di cemento comune)		Composizione (percentuale in massa) ^{a)}											Costituenti secondari	
			Costituenti principali												
			Clinker	Loppa di altoforno	Fumi di silice	Pozzolana		Cenere volante		Scisto calcinato	Calcare				
			K	S	D ^{b)}	naturale P	naturale calcinata Q	silicea V	calce W	T	L	LL			
CEM I	Cemento portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM II	Cemento portland alla loppa	CEM I/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM I/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento portland ai fumi di silice	CEM I/A-D	90-94	-	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		Cemento portland alla pozzolana	CEM I/A-P	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM I/B-P		65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5	
	CEM I/A-Q		80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5	
	CEM I/B-Q		65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5	
	CEM I/A-V		80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5	
	CEM I/B-V		65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5	
	Cemento portland alle ceneri volanti	CEM I/A-W	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5	
		CEM I/B-W	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5	
		Cemento portland allo scisto calcinato	CEM I/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
	CEM I/B-T		65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5	
	Cemento portland al calcare	CEM I/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5	
		CEM I/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5	
		CEM I/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5	
		CEM I/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5	
		Cemento portland composito ^{c)}	CEM I/A-M	80-94	6-20										0-5
			CEM I/B-M	65-79	21-35										0-5
	CEM III	Cemento d'altoforno	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM III/B			20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM III/C			5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM IV	Cemento pozzolanico ^{b)}	CEM IV/A	65-89	-	11-35					-	-	-	0-5		
		CEM IV/B	45-64	-	36-55					-	-	-	0-5		
CEM V	Cemento composito ^{c)}	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30				-	-	-	0-5		
		CEM V/B	20-38	31-50	-	31-50				-	-	-	0-5		
a) I valori del prospetto si riferiscono alla somma dei costituenti principali e secondari.															
b) La proporzione di fumi di silice è limitata al 10%.															
c) Nei cementi portland composti CEM I/A-M e CEM I/B-M, nei cementi pozzolanici CEM IV/A e CEM IV/B e nei cementi composti CEM V/A e CEM V/B i costituenti principali diversi dal clinker devono essere dichiarati nella denominazione del cemento (vedere esempio in 8).															

esclusivamente da clinker di cemento Portland macinato e gesso, infatti, rappresentano solo un'aliquota marginale del prodotto consumato nel settore delle costruzioni. Nell'ambito della Comunità Europea la produzione dei cementi è basata sul rispetto di requisiti composizionali, prestazionali e produttivi stabiliti dalla norma EN 197-1 richiamata dalle norme tecniche di attuazione del 14/01/2008 al capitolo 11 paragrafo 2.9.1., recepita anche a livello nazionale dalla norma UNI EN 197-1 (tabella 3.1) e a sua volta richiamata nel Decreto del Ministero dell'Industria del 13 settembre 1993. In accorso con queste normative, i cementi possono essere prodotti utilizzando i seguenti costituenti principali:

-clinker di cemento Portland (**K**); - gesso; - pozzolane naturali (**P**) e naturali calcinate (**Q**);
- ceneri volanti di tipo silicico (**V**) e calcico (**W**); - loppe granulate d'altoforno (**S**); -
microsilici o fumo di silice (**D**); - calcari (**L** o **LL**); - scisti calcinati (**T**).

3.1.3.1. Tipi di cemento

A seconda degli ingredienti impiegati e della relativa percentuale di utilizzo, i cementi comuni sono suddivisi in cinque tipi principali, individuati dalla sigla **CEM** seguita da un numero romano che varia da **I** a **V**. I cementi di tipo II, III, IV e V sono ulteriormente suddivisi in diversi sottotipi, in accordo alla tabella 3.1. Tutti i cementi, infine devono soddisfare i requisiti fisico-chimici e composizionali previste dalla UNI-EN 197-1.

CEM Portland I

I cementi di tipo I sono i cementi Portland puri, costituiti da una percentuale di clinker di cemento Portland almeno pari al **95%**. La parte restante può essere costituita da filler, additivi e da solfato, la cui presenza non deve comunque eccedere i limiti riportati nella tabella 3.1.

CEM Portland II di miscela

I cementi di tipo II sono disponibili in 19 sottotipi classificati a seconda della natura e della percentuale del componente secondario. In questi tipi di cemento il clinker è ancora predominante (almeno il 65%) e dove gli altri costituenti (escluso il fumo di silice impiegabile solo nell'intervallo 6-10%) possono oscillare entro due intervalli : (6-20% oppure 21-35%); nel primo caso apparirà nella sigla corrispondente la lettera A, mentre se l'intervallo composizionale è maggiore apparirà B . La sigla di questi cementi è formata da **II** , seguito dalla lettera A o B a seconda della quantità di costituente minerale, ed infine da una lettera che individua lo specifico costituente minerale: (es. S per loppa; P pozzolana naturale ecc., come mostrato nella tabella 3.1)

CEM III d'altoforno

I cementi di tipo III sono disponibili in 3 sottotipi per il quale sono previsti 3 livelli composizionali nel contenuto di loppa che vengono individuati nella sigla del cemento con:

A (loppe 36-65%), B (loppe 66-80%), C (loppe 81-95%). Quest'ultimo rappresenta il cemento con il minor contenuto di clinker (che può scendere fino al 5%) e che, proprio per questo, si caratterizza per il bassissimo calore di idratazione (apprezzato nei getti di massa), oltre che per un'ottima resistenza all'attacco del solfato, dei sali disgelanti e dell'acqua di mare. Ovviamente questo specifico cemento d'altoforno (con sigla III/C) non potrà essere disponibile se non nelle classi di resistenza più basse (32,5 o al massimo 32,5R), per la carenza del clinker necessario all'ottenimento di un'elevata resistenza meccanica alle brevi stagionature.

CEM IV Pozzolánico

I cementi di tipo IV sono disponibili in 2 sottotipi dove il contenuto di clinker è compreso negli intervalli 65-89% (A) oppure 45-64% (B) e come costituente minerale è presente una miscela di micro silice, cenere silicica e pozzolana naturale o industriale. Il *cemento pozzolánico (IV)* propriamente detto ed il *cemento d'altoforno (III)* si distinguono rispettivamente dal cemento Portland alla pozzolana (II) e dal cemento Portland alla loppe (II) per il minor contenuto di clinker. Quindi anche per il cemento pozzolánico, soprattutto quello (B) con maggior contenuto di pozzolana (36-85%), sarà difficile prevedere la disponibilità nelle classi di resistenza più elevate (42,5R, 52,5, 52,5R).

CEM V Composito

I cementi di tipo V sono disponibili in 2 sottotipi con un contenuto di clinker ridotto (40-64% oppure 20-39%) e con una percentuale della loppe, da una parte, e quella delle pozzolane e delle cenere, dall'altra, devono essere incluse nell'intervallo 18-30% (tipo V/A) oppure 31-50% (tipo V/B). Non va confuso con il cemento Portland composito (II/M) più ricco di clinker e povero in costituenti minerali. I Cementi di tipo V, al pari di quelli di tipo III, per la ridotta percentuale di clinker di cemento Portland, possono essere convenientemente impiegati per la realizzazione di strutture massive, caratterizzate da un elevato rapporto volume superficie, dov'è indispensabile limitare la velocità di sviluppo del calore d'idratazione e, quindi, ridurre i gradienti termici tra cuore e periferia della struttura responsabili della nascita di importanti quadri fessurativi. E' il caso, per esempio,

delle platee di fondazione di grande spessore, delle dighe, dei muri di contenimento negli inceneritori e delle fondazioni delle pile dai ponti di grande luce.

3.1.3.2. Le classi di resistenza del cemento

Ognuno dei tipi e sottotipi di cemento previsti dalla norma UNI EN 197-1 è disponibile, almeno in teoria, in sei differenti

Tabella 3.2 Requisiti fisico-chimici per i cementi comuni secondo il prospetto 2 della UNI – EN 197-1:

Classe di resistenza	Resistenza alla compressione MPa				Tempo di inizio presa min	Stabilità (espansione) mm
	Resistenza iniziale		Resistenza normalizzata			
	2 giorni	7 giorni	28 giorni			
32,5 N	-	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10
32,5 R	≥ 10,0	-				
42,5 N	≥ 10,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	
42,5 R	≥ 20,0	-				
52,5 N	≥ 20,0	-	≥ 52,5	-	≥ 45	
52,5 R	≥ 30,0	-				

L'appartenenza di un cemento a una determinata classe di resistenza, tra quelle sopramenzionate, è stabilita sostanzialmente dei valori di resistenza meccanica a compressione ottenuti su provini di malta “plastica” confezionati e conservati in accordo alle procedure previste dalla norma EN 196-1, dove sono riportati anche i dettagli operativi sugli ingredienti, sulla preparazione e confezionamento dell'impasto, sugli stampi e le attrezzature da utilizzare. Nella tabella 3.2, che individua i requisiti minimi in termini di resistenza a compressione di un determinato cemento, valutata su malta plastica, si può notare come la sigla numerica (per esempio 32,5) rappresenti il valore in N/mm² della tensione di rottura a compressione ottenuto a 28 giorni, indipendentemente che il cemento risulti a indurimento normale (N) o a indurimento rapido (R). La differenza tra due cementi N o R di pari classe sta nella resistenza a compressione valutata su provini maturati a 2 giorni, che dovrà risultare maggiore di 10 N/mm² o 20 N/mm², rispettivamente per i cementi di classe 42,5N e 42,5 R. Ancora una volta, ciò non significa che il calcestruzzo confezionato con cemento di classe 42,5N non possa attingere valori di resistenza a compressione a 2 giorni di 20 N/mm²; si potranno conseguire questi risultati, per esempio, adottando per il calcestruzzo con il cemento 42,5N rapporti a/c più bassi di 0,50. La norma,

tuttavia, vuole mettere in evidenza che a parità di tutte le condizioni il calcestruzzo confezionato con un cemento di classe 42,5R possiederà alle brevi stagionature (e in particolare dopo 2 giorni) prestazioni meccaniche superiori rispetto a un analogo impasto, di pari rapporto a/c, confezionato con un cemento di classe 42,5N. Inoltre per ogni classe di resistenza del cemento (32,5; 42,5; 52,5) la norma 197-1 prevede che siano rispettati i tempi di inizio presa e la sua stabilità in termini di espansione.

3.1.4. La scelta del cemento

Per le opere a cui si richiedono particolari prestazioni, è indispensabile scegliere con competenza sia il tipo sia il titolo del cemento da impiegare. Analizziamo i criteri generali che regolano la scelta del cemento per le varie opere che più frequentemente si incontrano nella pratica:

- *Opere in c.a. ordinario*: in linea generale saranno da preferire i cementi 32,5; pur tuttavia una scelta diversa potrà essere dettata da condizioni ambientali.
- *Opere in c.a. precompresso* : si impiegheranno, in genere, i cementi ad alta resistenza. In alcuni casi particolari, quando la pretensione delle armature avviene in tempi brevi, saranno preferiti i cementi 52,5, ad alta resistenza e rapido indurimento.
- *Manufatti prefabbricati*: tutti i cementi possono essere impiegati con buoni risultati. La scelta sarà condizionata dal ciclo di lavorazione, dalle esigenze di stoccaggio e di trasporto, dall'impiego.
- *Opere in ambiente aggressivo*: per le opere marittime in particolare, la scelta verrà fatta tra i cementi d'altoforno e pozzolanici, di tipo 32,5. Infatti, in questi casi, è necessario che nel calcestruzzo indurito non sia presente calce libera e ciò si ottiene impiegando, appunto, i cementi d'altoforno e pozzolanici. I cementi 42,5, invece, saranno impiegati soltanto se la maggiore resistenza meccanica potrà controbilanciare la minore resistenza chimica di questi ultimi rispetto ai cementi 32,5 garantendo la stessa durabilità.

- *Opere con strutture a faccia vista*: per queste strutture quando saranno preferiti i cementi bianchi ai normali cementi scuri, occorre prevedere tutti gli accorgimenti necessari per contenere gli effetti negativi connessi al titolo 52,5 con cui questi cementi sono prodotti.
- *Opere per sbarramenti di ritenuta*: poiché queste strutture sono massive è opportuno l'impiego di cementi a basso calore d'idratazione poiché in queste opere il calore di idratazione viene disperso molto lentamente, con conseguente accelerazione dell'indurimento del cemento e possibile aumento delle fessurazioni.

3.2. L'ACQUA

3.2.1. La qualità dell'acqua



La qualità dell'acqua utilizzata nel confezionamento del calcestruzzo assume un ruolo chiave nel definire le prestazioni meccaniche del conglomerato: un'erronea scelta, infatti, potrebbe determinare fenomeni di ritardo dei tempi di presa e di indurimento oppure indurre problemi di natura estetica sulla superficie dei manufatti

o, nei casi più gravi, generare forme di degrado precoce delle strutture. Relativamente alle acque per il confezionamento del calcestruzzo, la norma **UNI EN 1008:2003**, richiamata dalle NTC 2008 al capitolo 11 paragrafo 2.9.5., consente di impiegare sia acque potabili che acque di riciclo dell'industria del calcestruzzo, quelli provenienti da pozzi artesiani, quelle superficiali, le acque di mare e quelle reflue di origine industriale con la sola esclusione delle acque nere; per tutte, salvo per quelle potabili, deve esserne verificata l'idoneità all'impiego. Generalmente l'esame dell'acqua si basa su una valutazione preliminare per verificare l'eventuale presenza di oli e grassi, di sostanze acide, di prodotti di natura organica nonché di sostanze in sospensione. Quest'analisi preliminare, in sostanza, è finalizzata ad escludere che:

- inquinanti di natura organica possono rallentare la cinetica di idratazione con inevitabili ripercussioni negative sui tempi di disarmo delle strutture;
- eventuali tensioattivi possano promuovere indesiderati inglobamenti di aria nel calcestruzzo con conseguenti abbattimenti delle prestazioni meccaniche;
- tracce di olio e di grasso possano determinare sia un rallentamento dello sviluppo della resistenza che una diminuzione dell'adesione all'interfaccia pasta-aggregato con irrimediabili riduzioni delle prestazioni meccaniche. La presenza di oli e grassi, inoltre, potrebbe causare la comparsa di antiestetiche macchie sulla superficie dei manufatti;

- la presenza di sostanze acide produce forti ritardi dell'idratazione del cemento con conseguenze molto più dannose di quelle derivanti dall'eccesso di sostanze di natura organica.

Effettuata questa verifica preliminare è necessario, quindi, controllare il contenuto di alcune sostanze indesiderabili (*cloruri, solfati, alcali, zuccheri, fosfati, nitrati, piombo, zinco*) in accordo a quanto stabilito dalla EN 206-1. La restrizione nel contenuto delle sostanze indesiderate previste dalla norma ha l'obiettivo di evitare problematiche legate al processo produttivo del calcestruzzo: il limite da cloruro per impedire l'ossidazione delle armature, quello da solfati per impedire la formazione del gesso ed ettringite secondaria; il limite di alcali per minimizzare il rischio della reazione alcali-aggregato; il limite da zuccheri, fosfati, piombo e zinco, possono rallentare i tempi di presa ed indurimento; per motivi opposti risulta necessario limitare il contenuto di nitrati in quanto queste sostanze possono accelerare i tempi di presa e di indurimento e, conseguentemente, soprattutto nel periodo estivo, aumentare la perdita di lavorabilità durante il trasporto e messa in opera.

3.2.2. L'acqua d'impasto

L'acqua per i conglomerati cementizi è uno dei componenti essenziali essendo chiamata a svolgere più funzioni nell'ambito dell'impasto. L'acqua d'impasto totale A_{tot} , nel caso generale, può ritenersi somma di tre parti:

- l'acqua di presa **A_p**
- l'acqua di lavorabilità **A_l**
- l'acqua di bagnatura **A_b**

L'acqua di presa è quella che entra in combinazione con il cemento dando luogo ai processi chimico-fisici di presa e indurimento. L'acqua di lavorabilità agisce come un lubrificante all'interno dell'impasto, riducendo l'attrito tra i materiali solidi, e facendo crescere la classe di consistenza. L'acqua di bagnatura, che ricopre la superficie degli inerti di un film liquido, è necessaria poiché durante l'impasto gli inerti si bagnano. Nel calcolo del rapporto a/c efficace occorrerà, inoltre tener conto anche dell'acqua introdotta tramite

additivi liquidi, se introdotti in misura superiore a 3kg/m^3 , o le aggiunte minerali in forma di slurry (come, per esempio il fumo di silice o cenere volante) che generalmente ne contengono in percentuale variabile tra il 45 e il 55 % in massa.

L'acqua di presa A_p

La quantità di acqua di presa, ovvero la quantità d'acqua stechiometricamente necessaria per dar luogo alle reazioni di presa e di indurimento del cemento, è funzione sia del tipo di cemento impiegato, sia del dosaggio C dello stesso cemento nel conglomerato cementizio fresco in opera. In particolare, può scriversi: $A_p = a_p * C$, nella quale:

- a_p (litri/kg) : è l'acqua di presa per Kg di cemento ;
- C (kg/m³) : è il dosaggio di cemento ;

L'esatta determinazione di a_p viene condotta secondo le modalità prescritte all'art.6 del D.M. 3.6.1968 "Norme di accettazione dei leganti idraulici". In assenza di determinazioni dirette si può assumere per a_p il valore di 0,28 litri/Kg.

L'acqua di lavorabilità A_l

Come già indicato nei paragrafi precedenti, per lavorabilità s'intende l'insieme delle condizioni che assicurano al calcestruzzo il trasporto e la posa in opera senza che avvengano segregazioni dei componenti del calcestruzzo stesso. In ogni caso, per valutare l'acqua d'impasto occorre sempre tener presente la **regola di Lyse** che si basa su due enunciati tra loro complementari:

- a) assegnato il diametro massimo dell'assortimento granulometrico, d_{max} , la quantità di acqua d'impasto aumenta al crescere della classe di consistenza richiesta (da S1 a S5);
- b) assegnata la classe di consistenza, la quantità di acqua d'impasto decresce al crescere del diametro massimo d_{max} nell'assortimento granulometrico (tabella 3.3);

I dati mostrati nella tabella 3.3, riassumono esemplificativamente i due enunciati della *regola di Lyse*:

Tabella 3.3 Richiesta d’acqua in funzione de diametro massimo dell’aggregato e della classe di consistenza

Diametro (mm)	S1	S2	S3	S4	S5
8	195	210	230	250	255
16	185	200	220	240	245
20	180	195	215	225	230
25	175	190	210	215	225
32	165	180	200	210	220
63	140	155	175	185	190
125	125	140	155	165	170
160	120	135	150	160	165

Nota: I valori di acqua di impasto vanno ridotti di 10 kg/m³ per inerti alluvionali tondeggianti ed aumentati di 10 kg/m³ per inerti di frantumazione

L’acqua di bagnatura *Ab*

L’acqua di bagnatura è destinata a bagnare gli inerti ed è indispensabile affinché non venga a mancare l’acqua occorrente alle reazioni di idratazione del cemento. Il Ferèt nel 1982 enunciò, insieme alla citata legge (Cfr. 5.10) di proporzionalità tra la resistenza a compressione ed il fattore di resistenza, la seguente legge relativa all’acqua d’impasto:

“ la quantità di acqua necessaria per l’impasto è tanto più grande quanto più i grani dell’inerte sono fini ed è proporzionale alla quantità di inerte ”.

Infatti, aumentando nell’impasto la percentuale dell’inerte fino aumenta la superficie specifica complessiva degli inerti e quindi la loro acqua di bagnatura. Indicato con:

- a_b^s l’acqua di bagnatura per unità di peso di inerte fino (litri/kg)
- a_b^p l’acqua di bagnatura per unità di peso di inerte grosso (litri/kg)
- P_s il peso dell’inerte fino (Kg/m³)
- P_p il peso dell’inerte grosso (Kg/m³)

Contenuti in 1 m³ di conglomerato, risulta:

$$A_b = a_b^s * P_s + a_b^p * P_p$$

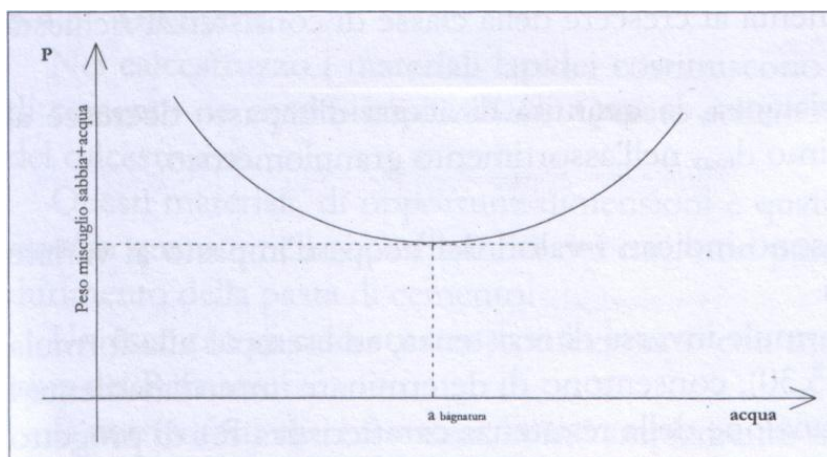
Per il calcolo dell’acqua di bagnatura unitaria si può procedere sia con determinazioni dirette, sia con l’ausilio di formule empiriche. In particolare, per elementi di dimensioni superiori ad 1mm, con buona approssimazione può usarsi la formula di Bolomey:

$$a_b = \frac{0,09}{\sqrt[3]{d1*d2}} \text{ (litri/kg)}$$

Per determinare l'acqua di bagnatura unitaria di una classe di inerti di dimensioni comprese tra i valori d_1 e d_2 (mm). Per la determinazione diretta dell'acqua di bagnatura si possono seguire diversi modi:

- Per l'inerte fino l'acqua di bagnatura unitaria a_b^s si può ricavare, con sufficiente attendibilità, con cosiddetto *metodo della parabola* (tabella 3.4). Scelto un campione di 1

Tabella 3.4 Metodo della parabola



Nota: L'acqua corrispondente al minimo peso costituisce l'acqua di bagnatura

10cc, e si rimescola accuratamente: si nota che la sabbia umidificata muta il colore. Si riempie poi, senza costipamento, un recipiente della capacità di mezzo litro e si pesa la quantità di miscuglio inerte-acqua in esso contenuta. Si svuota il recipiente e si aggiungono altri 10cc di acqua su tutto il materiale. Le operazioni si ripetono successivamente versando ogni volta 10cc di acqua e ricavando il peso del nuovo miscuglio inerte-acqua contenuto nel recipiente da mezzo litro. Si nota che i pesi del miscuglio contenuto nel recipiente andranno man mano diminuendo fino a raggiungere un minimo, oltre il quale aumenteranno. L'acqua corrispondente al peso minimo rappresenta l'acqua di bagnatura unitaria a_b^s (litri/kg). La spiegazione del fenomeno è semplice. L'acqua versata man mano sull'inerte fino serve a bagnare i granuli, avvolgendoli in un velo. Il velo d'acqua, quando il materiale è posto nel recipiente, sottrae spazio all'inerte facendo diminuire il peso del miscuglio di materiale solido contenuto nel recipiente. Quando l'inerte è completamente bagnato, i granuli di inerte non sono più in grado di ritenere l'ulteriore acqua che si

kg rappresentativo dell'inerte fino e posto lo stesso su un piano costituito da materiale non assorbente (vetro), si versa su di esso una piccola quantità d'acqua, ad esempio

aggiunge. Questa, pertanto, andrà a riempire i vuoti esistenti tra i grani di inerte bagnato facendo aumentare, quindi, il peso del miscuglio inerte-acqua contenuto nel recipiente.

- Per *l'inerte grosso*, invece, può seguirsi un metodo più semplice. Riempito d'inerte un recipiente di capacità nota e determinato il peso P_p (Kg) dell'inerte stesso, si versa acqua nel recipiente fino al suo riempimento. Svuotato il recipiente si fa scolare l'inerte e lo si pesa ancora bagnato. Ottenuto il nuovo peso P_I (Kg), l'acqua di bagnatura unitaria si calcolerà con la relazione:

$$a_b^p = \frac{(P_I - P_p)}{P_p}$$

3.3. L'aggregato

L'aggregato almeno da un punto di vista quantitativo gioca un ruolo di primaria importanza giacchè occupa circa i due terzi del volume del calcestruzzo. Gli aggregati utilizzati per il confezionamento del calcestruzzo sono costituiti da:

- elementi lapidei provenienti da giacimenti naturali, come nel caso degli inerti di origine alluvionale estratti dal letto dei fiumi;
- materiale granulare ottenuto dalla frantumazione delle rocce;
- materiale granulare ottenuto mediante processi industriali, come nel caso dell'argilla espansa utilizzata nel confezionamento dei calcestruzzi leggeri;
- materiale ottenuto per selezione e frantumazione di macerie provenienti dalla demolizione di edifici, di strutture in calcestruzzo armato oppure dal riciclo degli scarti di produzione del calcestruzzo negli stabilimenti che producono manufatti prefabbricati;

Ovviamente non tutti i materiali naturali, artificiali o di riciclo sono idonei per la produzione del calcestruzzo. Innanzitutto il fornitore di aggregati deve dichiarare le proprietà degli stesso in accordo a quanto richiesto dalla UNI 8520/1. I requisiti minimi per gli aggregati da impiegare nella produzione del conglomerato, stabiliti anche in funzione della tipologia di struttura cui il calcestruzzo è destinato, sono fissati dalla norma UNI 8520/2 parte integrante, per l'applicazione sul territorio italiano, della norma europea **UNI-**

EN 12620 annunciata attualmente dalle NTC 2008 al capitolo 11 paragrafo 2.9.2 . Gli aggregati destinati al confezionamento del calcestruzzo debbono, inoltre, essere provvisti di marcatura CE in accordo a quanto previsto dalla direttiva 89/106CEE e dal *D.P.R. n°246 del 21.04.1993*.

3.3.1. Proprietà degli aggregati che influenzano le caratteristiche reologiche del calcestruzzo allo stato fresco.

Le proprietà reologiche del calcestruzzo allo stato fresco sono fortemente influenzate dal volume, dalla natura e dalla dimensione dei granuli degli aggregati in quanto questi parametri determinano il volume a disposizione del “fluido trasportatore” rappresentato dalla pasta cementizia.

3.3.1.1. La caratterizzazione granulometrica degli aggregati



Foto 3.12 Stacci conformi alla UNI-EN 933-1

La caratterizzazione dell'aggregato dal punto di vista granulometrico si effettua mediante la **UNI EN 933-1** determinando la percentuale di granuli di stessa dimensione mediante una serie di vagli (a maglia quadrata *stacci*, a fori rotondi *crivelli* , foto 3.12) impilati dall'alto verso il basso con aperture decrescenti, e si trasmette ad essi, a

mezzo di scosse (foto 3.13), o moto alternativo, l'energia necessaria affinché tutti gli elementi di dimensione inferiore all'apertura del

vaglio i-esimo possano passare attraverso lo stesso. Sono due le serie di setacci previste dalla norma EN 12620 per la determinazione della granulometria dell'aggregato (tabella 3.5.), quella ottenuta:



Foto 3.13 Setacciatore meccanico

Tabella 3.5 Aperture dei setacci secondo la EN 12620 della serie base e delle serie 1 e 2

SETACCI DI BASE + SERIE 1 (mm)																
0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	5,6 (5)	8	11,2 (11)	16	22,4 (22)	31,5 (32)	45	63	-	-
SETACCI DI BASE + SERIE 2 (mm)																
0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6,3 (6)	8	10	12,5 (12)	14	16	20	31,5 (32)	40	63

impiegando i setacci della “serie base” cui aggiungere della “serie 1” oppure della “serie 2”. L’analisi granulometrica prevista dalla UNI EN 933-1 (tabella 3.6) consiste nel determinare la percentuale di granuli che vengono trattenuti “**trattenuto parziale**”(che quindi posseggono dimensioni maggiori dell’apertura del setaccio e minori di quella del setaccio di apertura immediatamente maggiore) in corrispondenza di ognuno dei setacci utilizzati:

$$\% \text{ Tratt.parz.} = 100 * \frac{\text{peso tratt.staccio (i)}}{\text{peso totale}}$$

essa consente di classificare l’aggregato in base all’apertura del setaccio di maggiore e minore dimensione (D/d) cui corrispondono le percentuali di materiale “**trattenuto cumulativo**”:

$$\% \text{ Tratt. Cum.} = \% \text{ Tratt. (i)} + \% \text{ Tratt. (i+1)} \quad i = n \text{ staccio}$$

o “**passante cumulativo**” (il completamento a 100 del trattenuto cumulativo):

$$\% \text{ Pass. Cum.} = 100 - \% \text{ Tratt. Cum.}$$

Tabella 3.6 Esempio distribuzione granulometrico prevista dalla UNI EN 933-1 di un campione di sabbia

DISTRIBUZIONE GRANULOMETRICA - METODO DI SETACCIATURA UNI EN 933-1				
(metodo usato: stacciatura a secco)				
Campione		Sabbia Irpinia		
Provenienza		Avellino		
Apertura setaccio d (mm)	Peso trattenuto (g)	% Trattenuto parziale	% Trattenuto cumulativo	% Passante cumulativo
31,5	0	0,00	0,00	100,00
25	0	0,00	0,00	100,00
20	0	0,00	0,00	100,00
16	0	0,00	0,00	100,00
12,5	0	0,00	0,00	100,00
8	0	0,00	0,00	100,00
6,3	0	0,00	0,00	100,00
4	22	1,93	1,93	98,07
2	171	14,97	16,90	83,10

1	268	23,47	40,37	59,63
0,5	220	19,26	59,63	40,37
0,4	66	5,78	65,41	34,59
0,25	120	10,51	75,92	24,08
0,18	34	2,98	78,90	21,10
0,125	101	8,84	87,74	12,26
0,075	32	2,80	90,54	9,46
0,063	34	2,98	93,52	6,48
fondo	74	6,48	100,00	0,00
Totale	1142			
Modulo di finezza Mf				
3,76				

Riportando in un grafico la % di materiale passante **Pass.Cum.** in funzione dell’apertura (**d**) del vaglio, si costruisce la cosiddetta “**curva granulometrica**. Sulla base dell’analisi granulometrica è possibile, quindi, effettuare una prima distinzione tra **aggregati grossi e fini** . Gli inerti di dimensioni inferiore a 4mm costituiscono gli inerti fini e vengono definiti *sabbie*; per dimensioni maggiori si hanno gli inerti grossi, ovvero le *ghiaie* e i *pietrischi* a seconda che si tratti di elementi di roccia da frantumazione naturale o di roccia da frantumazione meccanica. Gli aggregati fini (*sabbie*) oltre ad essere individuati dall’apertura dei setacci D/d possono essere caratterizzati dal punto di vista granulometrico attraverso il **modulo di finezza** che rappresenta la somma dei trattenuti cumulativi percentuali ai setacci di apertura 0,125, 0,250, 0,5, 1, 2 e 4 mm divisa per 100:

$$M_f = \sum_1^n \frac{tratt.cumulativo}{100}$$

Il modulo di finezza, quindi, assume grande importanza nello studio della composizione granulometrica degli inerti da impiegare nel confezionamento dei conglomerati cementizi. Esso, infatti, consente sia di caratterizzare la granulometria del miscuglio con un solo numero, sia di operare un rapido confronto tra granulometrie di due o più aggregati misti, infatti il modulo di finezza cresce con l’aumentare dell’incidenza percentuale dei granuli di dimensione più grande (*ghiaie* o *pietrischi*), mentre al decrescere del modulo di finezza vuol dire che diminuiscono le dimensioni dei granuli (*sabbie*, *sabbione* o *filler*). Il **filler** è costituito, invece, da materiale finissimo di dimensioni inferiori a 2mm e granuli che almeno per il 70% posseggono dimensioni minori di 0,063mm. Sono previsti, infine, due tipologie di aggregati con distribuzione granulometrica continua provvisti di granuli di

dimensioni variabili da 8 oppure da 45mm, rispettivamente per l’aggregato denominato “**Naturale 0/8**” e “**Misto**”, fino a granuli finissimi tipici delle sabbie.

Il diametro massimo dell’aggregato grosso d_{max} non rappresenta la massima dimensione dei granuli che lo costituiscono,(come si evince dalla tabella 3.7) ma l’apertura del vaglio cui corrisponde una percentuale di

Tabella 3.7 Requisiti granulometrici previsti dalla norma UNI-EN 12620

Tipo di aggregato	Passante a D %	Trattenuto a D %	Passante a d %
Aggregato grosso $D > 11,2mm$ e $D/d > 2$	90-99	10-1	0-15
Aggregato grosso $D < 11,2mm$ e $D/d \leq 2$	85-99 80-99	15-1 20-1	0-20 0-20
Aggregato fine $D \leq 4mm$ e $d = 0$	85-99	15-1	-
Naturale 0/8 $D = 8mm$ e $d = 0$	90-99	10-1	-
Misto $D = 45mm$ e $d = 0$	90-99	10-1	-
Filler	Passante a 2mm 100	Passante a 0,125mm 85-100	Passante a 0,063 70-100

materiale di dimensione maggiore di D variabile tra 1 e 20%. Il “diametro massimo” viene definito convenzionalmente, come l’apertura del setaccio sul quale rimane trattenuto il 5 % di aggregato. Il diametro massimo dell’aggregato è funzione, infatti, delle dimensioni dell’elemento strutturale, delle eventuali armature e dell’effetto di parete ed inoltre deve tener conto anche dei seguenti vincoli:

- a) non deve superare il 25% della sezione minima della struttura (per evitare di aumentare le eterogeneità del materiale);
- b) non deve superare la distanza tra i ferri di armatura diminuita di 5mm (per evitare che l’aggregato più grosso ostruisca il flusso del calcestruzzo attraverso i ferri stessi);
- c) non deve superare del 30% lo spessore del copriferro (per evitare che tra casseri e ferri di armatura sia ostruito dal passaggio del calcestruzzo);

3.3.2. Porosità, assorbimento e umidità degli aggregati:

All'interno dei granuli dell'aggregato sono presenti dei pori di dimensioni variabili da qualche decimo di micron a qualche decimo di millimetro, alcuni dei quali sono completamente circondati dallo scheletro solido dell'elemento lapideo (**pori chiusi**) altri, invece, sono comunicanti con l'esterno (**pori aperti**). Il quantitativo di acqua rispetto alla massa secca dell'aggregato necessario a saturare completamente i pori aperti dell'aggregato (che può essere

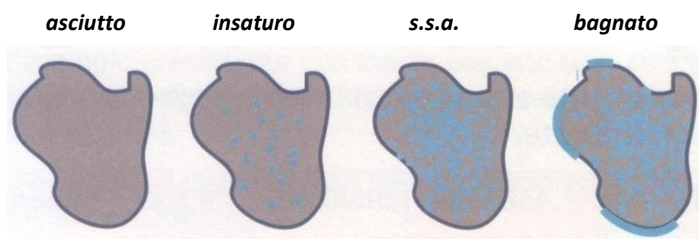


Foto 3.14 Condizione degli aggregati nella fase di confezionamento del calcestruzzo

determinato con la procedura descritta dalla norma UNI-EN 1097-6) prende il nome di **assorbimento**. Esso dipende sostanzialmente dalla natura della roccia da cui provengono i granuli lapidei;

pertanto, per aggregati provenienti da una stessa cava non subisce modifiche sostanziali nel tempo e la sua determinazione può essere effettuata con cadenza semestrale. Per gli aggregati disponibili sul territorio nazionale l'assorbimento varia fra: per le sabbie dallo



Foto 3.15 Picnometri ed un cono e pestello per la determinazione della massa volumica dei granuli ed assorbimento d'acqua

0,2 all'1,5 %, per gli aggregati grossi dallo 0,8 al 3% circa. Gli aggregati disponibili presso la centrale di betonaggio per il confezionamento del calcestruzzo generalmente si presentano (foto 3.14): con i pori aperti completamente privi di acqua (aggregato **asciutto**), con i pori aperti parzialmente riempiti di acqua (aggregato **insaturo**), con i pori aperti completamente saturi e la superficie ricoperta da un velo di acqua (aggregato **bagnato**).

La massa di acqua in percentuale rispetto alla massa secca dell'aggregato prende il nome di **umidità (u)** dell'aggregato valutata nel seguente modo: $u = \frac{m-mo}{mo} * 100$ dove m ed mo sono rispettivamente la massa dell'aggregato così come disponibile e quella dell'aggregato completamente essiccato.

L'assorbimento (ua), quindi, non è altro che un particolare valore di umidità che individua un aggregato con le porosità aperte sature e la superficie asciutta: **aggregato saturo a superficie asciutta (s.s.a.):**

$ua = \frac{m_{ssa} - m_o}{m_o} * 100$ dove ms.s.a. è la massa dell'aggregato conservato sotto acqua fino a completa saturazione ed asciugato in superficie. Per la determinazione della massa volumica dei granuli in s.s.a. (**UNI-EN 1097-6:2002**) si utilizza un **picnometro** in vetro ed un **cono con pestello** in acciaio per individuare la condizione in s.s.a. (fig.3.15). Nella pratica di cantiere l'aggregato si troverà spesso nella situazione di insaturo, qualche volta (dopo una pioggia) bagnato, raramente in quella di asciutto, ed ancor più raramente in quella si s.s.a. In altre parole un inerte bagnato cede l'acqua in eccesso ($u > ua$) rispetto alla situazione si s.s.a. che va a sommarsi all'acqua introdotta in betoniera, facendo aumentare il valore dell'acqua totale di impasto. D'altra parte, un inerte insaturo ($u < ua$) ed ancor più un inerte asciutto ($u = 0$) comporterà una suzione di acqua da parte dell'inerte cosicché questo si porta in condizione di s.s.a. con conseguente diminuzione della effettiva acqua di impasto. Per questo motivo è opportuno individuare il valore effettivo dell'umidità e calcolare la giusta pesata nella condizione dell'inerte in s.s.a. Non è sufficiente, misurare l'umidità dell'aggregato soltanto di primo mattino, all'avvio della produzione, in quanto la stessa potrebbe subire variazioni significative nel cumulo di materiale stoccato o all'interno delle tramogge e condurre un erronea valutazione dell'acqua d'impasto con conseguente ripercussioni negative sul rapporto a/c e sulla lavorabilità del calcestruzzo. Per risolvere questo problema della misurazione dell'umidità dell'aggregato in tempo reale vengono impiegate sonde (di resistività o a onde elettromagnetiche) che attraverso la misura e mediante curve di correlazione si è in grado di determinare il quantitativo di acqua nell'aggregato. Con questo sistema di misurazione si ottiene uno scostamento del valore effettivo dell'acqua d'impasto di pochissime percentuali, quindi favorendo una diminuzione dello scarto quadratico medio nelle centrali di betonaggio ,con conseguenti benefici sia sulla sicurezza delle strutture che sull'economicità del processo produttivo.

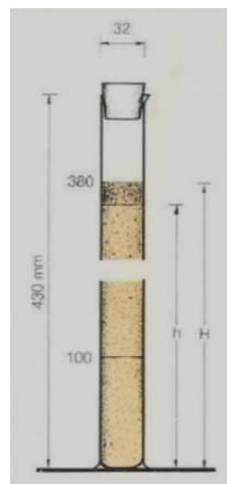
3.3.3. Proprietà degli aggregati che influenzano le caratteristiche elasto-meccaniche del calcestruzzo allo stato indurito.



Foto 3.16 Strumento per prova di abrasione con tamburo rotante, detta "Los Angeles"

E' stato più volte accennato che la resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo dipende quasi esclusivamente dalle proprietà della matrice cementizia. Questo assunto si basa sul fatto che la pasta di cemento rappresenta l'anello debole della catena in quanto la maggior parte delle rocce da cui derivano gli aggregati per il confezionamento del conglomerato

posseggono resistenze meccaniche a compressione di gran lunga superiori all'incirca 150 N/mm^2 per i calcari fino a oltre 250 N/mm^2 per le rocce quarziti. Pertanto, la resistenza a compressione dell'aggregato risulta dalle 5 alle 8 volte maggiore di quella dei conglomerati cementizi più diffusi la cui resistenza è generalmente di $25\text{-}30 \text{ N/mm}^2$. Tuttavia è da evidenziare che la resistenza a compressione dell'aggregato, che riveste un ruolo marginale nel definire le



prestazioni meccaniche del calcestruzzo, è funzione della durezza dell'inerte. La durezza dell'inerte quindi, viene interpretata come "resistenza alla abrasione" attraverso un metodo del tamburo rotante detto di "Los Angeles" (foto 3.16): dopo la prova, si misura la perdita come frazione e dev'essere $< 1,7 \text{ mm}$. E' ben noto che il collasso del conglomerato inizia in corrispondenza dell'interfaccia pasta-aggregato (zona di transizione), per poi propagarsi all'interno della matrice cementizia. A conferma di quanto sostenuto si sottolinea come la resistenza a compressione di una determinata pasta di cemento diminuisca all'aumentare della percentuale in volume di aggregato aggiunto all'impasto. In sostanza, quindi, pur sostituendo alla pasta di cemento un materiale, l'aggregato lapideo, di migliori prestazioni meccaniche, la resistenza del conglomerato diminuisce proprio per la formazione della zona di transizione ove si innesca la fessurazione responsabile del collasso sotto sforzi di compressione. Gli aggregati possono presentare quindi una **tessitura** variabile da quella

liscia tipica di un marmo a quella rugosa tipica dei graniti; quest'ultima favorisce una migliore compenetrazione con la pasta di cemento e, conseguentemente, una migliore adesione che porta ad un incremento della resistenza a compressione rispetto ad un impasto, di pari rapporto a/c, ma confezionato con aggregati a tessitura liscia. Le prestazioni meccaniche del calcestruzzo sono, inoltre, influenzate anche dalla presenza sulla superficie dei granuli di particelle di materiale finissimo che possono ridurre l'adesione con la matrice cementizia. Le particelle fini che sono in grado di inquinare gli aggregati sono costituite dai residui di polvere derivanti dal processo produttivo e da materiale di natura limo-argillosa, per questo motivo la norma UNI 8520/2 impone un limite al contenuto di frazioni fini passanti allo staccio di 0,063mm in funzione della natura dell'aggregato. Se gli aggregati posseggono una percentuale di finissimo maggiore prevista dalla norma, prima dell'utilizzazione nel confezionamento del conglomerato, debbono essere sottoposti ad una ulteriore prova tesa ad accertare se le sostanze finissime sono di natura limo-argillose, poiché, se così fosse, oltre ad incrementare la richiesta d'acqua sarebbero anche pericolose per il possibile abbattimento delle prestazioni meccaniche del conglomerato. Questa valutazione si esegue mediante un test di sedimentazione (in accordo con la norma

*Foto 3.17 Volume
graduato per prova di
equivalente in sabbia*

UNI EN 933-8) che misura l'**equivalente in sabbia (ES)** (foto 3.17) oppure mediante la valutazione del **valore del blu di metilene** (foto 3.18) (in accordo alla UNI-EN 933-9). L'aggregato risulta accettabile se il coefficiente ES ($h/H * 100$) risulta non inferiore a 80 o 70 rispettivamente per aggregati naturali e di frantumazione oppure se il valore di blu è inferiore a 1,2 g/kg. A differenza della resistenza a compressione il modulo elastico degli aggregati influenza la rigidità del conglomerato cementizio. La maggior parte degli inerti impiegati per il confezionamento del conglomerato possiede modulo di elasticità compreso tra 40.000-90.000 N/mm², e pertanto, maggiore di quello della pasta di cemento i cui valori si attestano tra 15.000-20.000 N/mm². Il modulo elastico del calcestruzzo è rappresentato dalla media ponderale dei moduli elastici della matrice cementizia e dei granuli lapidei, quindi, aumenta con la rigidità e il volume occupato dagli aggregati nel conglomerato. Il modulo di elasticità degli inerti, infine, influenza anche la stabilità dimensionale del calcestruzzo: infatti, sebbene non direttamente coinvolti nel fenomeno del ritiro igrometrico gli aggregati si oppongono alla contrazione di volume della pasta di cemento in misura tanto maggiore quanto più elevato è il loro modulo di elasticità.



Foto 3.18 Prova del blu di metilene

3.3.4. Proprietà degli aggregati che influenzano la durabilità delle strutture in calcestruzzo armato.

Il degrado, tuttavia, può manifestarsi anche in calcestruzzi di qualità eccellente confezionati con bassi rapporti acqua/cemento e, quindi, contraddistinti da una microstruttura particolarmente densa e compatta, allorquando nel confezionamento vengono impiegati ingredienti e, in particolare, aggregati che contengono sostanze incompatibili con i prodotti d'idratazione del cemento oppure con le sostanze disciolte nella fase acquosa dei pori capillari. Per questo motivo nella scelta degli aggregati destinati

alla produzione del calcestruzzo occorre verificare preliminarmente che questi non contengono sostanze indesiderabili capaci di provocare reazioni chimiche o elettrochimiche deleterie per la durabilità dei manufatti. Le sostanze indesiderabili più frequentemente presenti nei granuli lapidei e nelle rocce sono alcune forme di *silice* non stabili nell'ambiente alcalino del cemento, i *cloruri*, i *solfati* e i *solfuri*. Un'altra proprietà molto importante ai fini della durabilità per gli aggregati è la *gelività*, aspetto da tener presente quando si utilizzano calcestruzzi sottoposti a cicli di gelo e disgelo.

3.3.4.1. Silice Alkali-Reattiva

Alcune forme di silice presenti nell'aggregato, quelle amorfe, mal cristallizzate o comunque deformate ancorchè cristalline, possono reagire con gli alcali del cemento (sodio e potassio) per formare silicati alcalini idrati di carattere espansivo e fortemente dirompenti nei confronti della circostante matrice cementizia. Questa reazione, nota come **reazioni alcali-silice**, oppure ASR (*Alkali-Silica-Reaction*), si manifesta attraverso fessurazioni irregolari o espulsioni localizzate di materiale (*pop-aut*) che possono pregiudicare seriamente la durabilità delle opere in calcestruzzo. Attualmente la presenza di **silice reattiva** nell'aggregato rappresenta la più insidiosa ed erratica forma di degrado del calcestruzzo. Ciò dipende dal concorso di più cause:

- a) La presenza di silice reattiva in un inerte, a differenza della presenza di cloruro o solfato rilevabile con una semplice e rapida analisi chimica, può essere accertata con molta difficoltà e tempi lunghi.
- b) La silice reattiva è distribuita in forma discreta (per esempio, è presente in qualche granulo di inerte, ma è completamente assente negli altri): ciò comporta il rischio di non evidenziare la sua presenza se il campione di inerte sotto esame non contiene alcun granulo di silice reattiva e di considerare, quindi, accettabile un inerte che dovrebbe, invece, essere scartato.
- c) La reazione alcali-silice dipende dal contenuto di alcali nel calcestruzzo: un contenuto di alcali oltre la soglia di 3kg per metro cubo di calcestruzzo è considerato pericoloso; a causa della variazione del contenuto di alcali da cemento

a cemento o con il dosaggio di cemento, la reazione alcali-silice presenta una certa erraticità e si può manifestare in condizioni apparentemente eguali.

- d) La reazione alcali-silice può decorrere solo in presenza di umidità e si verifica, quindi, più frequentemente in ambienti esterni, ma anche in ambienti chiusi come avviene nei pavimenti industriali non protetti con barriera a vapore ed esposti alla risalita capillare di acqua del terreno.
- e) La reazione alcali-silice è in generale molto lenta ed è accelerata alle temperature più elevate; tuttavia il fenomeno può richiedere da qualche mese ad una decina di anni per potersi manifestare.

Per questo motivo la norma **UNI 8520/22** impone che gli aggregati per calcestruzzo vengano sottoposti prima del loro impiego ad un esame *petrografico* da condursi in accordo alla norma UNI-EN 932-3, per accertare la presenza di minerali alcali reattivi. A causa dell'erraticità del fenomeno e della difficoltà di diagnosticare preliminarmente la reattività della silice, il miglior modo per affrontare il problema è quello di impiegare cementi di miscela alla cenere o alla loppa oppure di cementi pozzolanici, d'altoforno o compositi in presenza dei quali la reazione alcali-silice è fortemente ridotta o addirittura eliminata.

3.3.4.2. Cloruro

Il degrado da cloruri, inoltre, deve essere prevenuto anche attraverso un'oculata scelta degli ingredienti al fine di evitare che già al momento del confezionamento dell'impasto nella fase acquosa della matrice cementizia si realizzino concentrazioni critiche sufficienti per innescare il processo corrosivo. Relativamente ai cloruri introdotti tramite (in accordo alla UNI-EN 1744/7) la norma **UNI 8520/12** stabilisce che, indicativamente, essi debbono risultare inferiori allo 0,03% in massa. Considerando che gli aggregati vengono impiegati in un calcestruzzo in misura di circa 1850 Kg/m^3 e che il dosaggio medio di cemento in un impasto è all'incirca 280 kg/m^3 , la percentuale di cloruri aggiunti tramite inerti contraddistinti dal tenore massimo di Cl' risulta più o meno dello 0,2%, e quindi, pari

approssimativamente alla metà della minima concentrazione ritenuta critica ai fini dell'innescio della corrosione dei ferri. Questa posizione della norma 8520/2 è condivisibile in quanto ai fini della durabilità è importante che il cloruro complessivo nel calcestruzzo risulti compreso fra il 0,2 e 0,4% quanto stabilito dalla norma EN 206 .

3.3.4.3. Solfati e Solfuri

Il *solfato* può essere presente nell'inerte in forma di gesso bi-idrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) o anidride (CaSO_4). La presenza di solfato (SO_3) nell'inerte oltre un certo limite (0,2-0,8% in massa) comporta il rischio di fessurazione del calcestruzzo per formazione di ettringite espansiva a seguito della reazione con gli alluminati del cemento. Ci si potrebbe chiedere perché il gesso è tollerato, anzi indispensabile, nel cemento, mentre è guardato come fonte di degrado se presente nell'inerte. Il gesso del cemento è macinato nel mulino insieme al clinker e per la sua elevata finezza si scioglie nell'acqua di impasto rapidamente e reagisce, quindi, quindi, immediatamente con gli alluminati del clinker formando una pellicola protettiva di ettringite (**primaria**) sui granuli di cemento impedendo una presa troppo rapida: esso agisce da regolatore della presa del cemento senza che l'espansione, associata alla formazione di ettringite, abbia ripercussioni negative in quanto avviene uniformemente (su tutti i granuli di cemento) e nelle prime ore di idratazione all'interno di un sistema plastico o comunque deformabile. Al contrario, il gesso eventualmente presente nell'inerte è granulometricamente grossolano e si scioglie nell'acqua che riempie i pori capillari molto lentamente e reagisce, quindi, altrettanto lentamente con gli alluminati del cemento. Questa ettringite, detta **secondaria** perché si forma in un secondo tempo cioè si forma all'interno del calcestruzzo ormai indurito e quindi molto rigido, ed è in grado, pertanto, di provocare pericolose tensioni per il carattere espansivo della reazione che porta alla formazione di ettringite. Per cui gli inerti inquinati da gesso o anidride non possono essere bonificati con alcun trattamento e debbono essere assolutamente scartati dalla produzione di calcestruzzi a base cementizia. La norma **UNI 8520/11** quindi, suggerisce indicazioni da adottare per determinare il contenuto di solfati solubili in acido (in accordo alla UNI-EN 1744/1 punto12). Con altrettanto sospetto debbono essere guardati gli inerti contenenti minerali a

base *solfuri* quali pirite, pirottina o marcasite che a contatto con acqua e ossigeno formano un ossido un solfato ferroso provocando fenomeni espansivi, correlati con la formazione di ettringite secondaria. Anche in questo caso bisogna fare un'analisi petrografica per evitare che vengano immessi nel calcestruzzo sostanze che possono creare problemi alla durabilità del calcestruzzo.

3.3.4.4. *Gelività*

La Gelività degli inerti è solitamente associata alla presenza di acqua nei pori dell'inerte, seguita dalla creazione di una pressione idraulica che accompagna l'aumento di volume (circa il 9%) generato dalla formazione dei primi germi cristallini del ghiaccio al di sotto di 0°C. La formazione del ghiaccio genera tensioni dirompenti solo se dentro i granuli dell'inerte sono presenti micropori con diametro di qualche μm . Infatti, nei micropori più piccoli la formazione di ghiaccio non può avvenire per la mancanza di spazio sufficiente alla crescita dei cristalli di ghiaccio. La norma **UNI 8520/20** prevede, in merito a questo problema legato alla durabilità, un'analisi da effettuare per verificare la presenza o meno di inerti gelivi. Gli inerti gelivi non sono ovviamente accettabili per strutture in calcestruzzo esposte ai cicli di gelo-disgelo anche se si impiegano additivi aeranti capaci di proteggere la matrice cementizia dall'azione del gelo.

3.4. GLI ADDITIVI

Gli additivi per il calcestruzzo sono sostanze chimiche di natura organica (generalmente impiegati in forma liquida) che vengono aggiunti in percentuali rispetto alla massa del cemento variabili tra lo 0,1 e 3%, producendo sensibili modifiche alle caratteristiche del conglomerato sia allo stato fresco che a quello indurito. Gli additivi per il calcestruzzo vengono classificati, in accordo con la norma **UNI-EN 934-2** richiamata dalle NTC 2008 al capitolo 11 paragrafo 2.9.4., che ne definisce anche i requisiti minimi, in base alla funzione principale che essi svolgono allorquando vengono introdotti nell'impasto. Gli additivi destinati al confezionamento del calcestruzzo debbono, inoltre, essere provvisti di marcatura CE in accordo a quanto previsto dalla direttiva 89/106CEE. La norma UNI-EN 934-2 classifica gli additivi in :

- additivi *riduttori d'acqua/fluidificanti*;
- additivi *riduttori d'acqua ad alta efficacia/superfluidificanti*;
- additivi *acceleranti di presa*;
- additivi *acceleranti di indurimento*;
- additivi *ritardanti di presa*;
- additivi *ritardante di presa/riduttore d'acqua* (fluidificante ritardante);
- additivi *ritardante di presa/riduttore di acqua ad alta efficacia* (superfluidificante ritardante);
- additivi *accelerante di presa/riduttore d'acqua* (fluidificante accelerante);
- additivi *aeranti*;
- additivi *resistenti all'acqua*;
- additivi *ritentori d'acqua*;

Nei paragrafi che seguono vengono discusse le principali modifiche determinate dall'introduzione di ognuno dei prodotti menzionati alle proprietà del conglomerato e i relativi campi di applicazione.

3.4.1. Gli additivi resistenti all'acqua

Gli additivi *resistenti all'acqua* comunemente chiamati anche come additivi *idrofobizzanti*, sono in grado di ridurre l'assorbimento di acqua per capillarità ovvero rendere idrorepellente l'epidermide del calcestruzzo (fig.3.19). Questi additivi sono costituiti da metilsiliconati, da prodotti a base silanica o anche da stearati che hanno come effetto collaterale quello di interferire sul processo di idratazione del cemento determinando una riduzione e, quindi, una penalizzazione delle

prestazioni meccaniche di circa il 15-20% rispetto ad un conglomerato non additivato. L'utilizzo di additivi resistenti all'acqua appare molto promettente nelle applicazioni di calcestruzzi esposti alle classi di esposizione particolarmente aggressive, per la presenza dei cloruri come sali disgelanti (XF4) oppure come acque marine nelle zone ciclicamente bagnate ed asciugate (XS3). In entrambi i casi gli ioni cloruro diffondono attraverso la fase acquosa che riempie i pori capillari per effetto della suzione capillare, se però il calcestruzzo è trattato con questi additivi, l'acqua ambientale che trasporta i sali disgelanti e gli ioni presenti nel mare, viene “respinta” dalla matrice cementizia perché l'angolo di bagnatura Θ diventa maggiore di

90° (fig 3.20) e quindi la pressione capillare diventa negativa. In altre parole, la suzione capillare dell'acqua non può avvenire se la fase acquosa non riempie i pori capillari ed i

cloruri non possono nemmeno diffondere, in assenza di acqua nei pori, attraverso il copriferro verso le armature metalliche in accordo alla seconda legge di Fick.



Figura 3.19 Effetto d'interazione tra acqua e una superficie di CLS non resa idrofoba (provino a sinistra) e una superficie di CLS resa idrofoba (provino a destra)

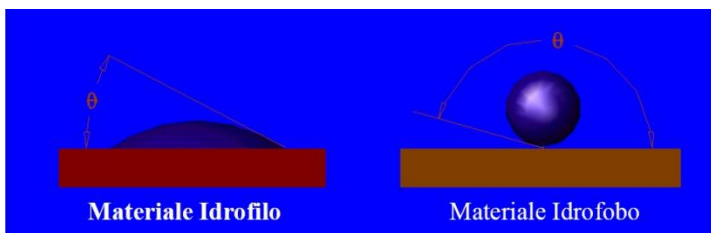


Figura 3.20 Angolo di bagnatura differente a seconda se il materiale è idrofilo o idrofobo

3.4.2. Gli additivi ritentori d'acqua

Gli additivi *ritentori d'acqua* comunemente chiamati anche come additivi *viscosizzanti* (VMA), sono a base di natura cellulosica o polimeri ad alto peso molecolare e si impiegano nel calcestruzzo per ridurre, attraverso un aumento della viscosità della pasta di cemento, l'acqua essudata cioè il *Bleeding*. Questi prodotti vengono anche utilizzati: sia per migliorare la pompabilità dei calcestruzzi magri qualora il contenuto di fini (cemento e filler) sia inferiore ad un certa soglia critica (450 Kg/m^3) e sia per ridurre il fenomeno delle segregazione nei calcestruzzi autocompattanti (SCC). Tuttavia, il loro impiego è attualmente limitato per via del fatto che gli stessi vantaggi conseguibili dal loro utilizzo sono ottenuti a costi decisamente più bassi ricorrendo alle aggiunte minerali ed, in particolare, alle ceneri volanti.

3.4.3. Gli additivi ritardanti di presa

Gli additivi ritardanti di presa sono prodotti chimici a base di gluconato, glucosio e zuccheri, in grado di rallentare l'idratazione del cemento e, quindi, di allungare il tempo in cui il calcestruzzo rimane allo stato plastico. Questa esigenza si avverte allorquando occorre trasportare il calcestruzzo per grandi distanze, con lunghi tempi di percorrenza, soprattutto nei periodi caldi quando la cinetica di idratazione del cemento risulta particolarmente veloce. E' da evidenziare, inoltre, come gli additivi ritardanti di presa posseggono anche sia pur modesta capacità di ridurre l'acqua d'impasto a parità di consistenza, di circa il 2-5% in funzione del dosaggio di prodotto (generalmente varia fra il 0,2-0,5% rispetto alla massa del cemento). Un secondo importante campo di applicazione degli additivi ritardanti è rappresentato dalla produzione dei calcestruzzi destinati alla realizzazione di strutture a grande sviluppo orizzontale (platee e pavimentazioni) o lineare (muri) laddove, per i rilevanti volumi, la posa in opera avviene in molte ore e dove, quindi, un possibile ritardo nella consegna del conglomerato, tra una betoniera e quella successiva potrebbe determinare la formazione di un giunto freddo che in servizio potrebbe da luogo alla nascita di indesiderati quadri fessurativi. In questo contesto l'allungamento dei tempi di presa consente in corrispondenza della ripresa di getto di avere il calcestruzzo già in

opera ancora allo stato plastico garantendo, quindi, la monoliticità tra le due porzioni di struttura realizzate in tempi diversi.

3.4.4. Gli additivi acceleranti di presa

Gli additivi acceleranti di presa sono sostanze capaci, soprattutto alle basse temperature, di anticipare i tempi di inizio e fine presa del conglomerato. Sebbene la loro azione principale si espliciti sull'idratazione degli alluminati, tuttavia, essi inevitabilmente modificano anche la cinetica di idratazione dei silicati e, conseguentemente, lo sviluppo delle resistenze del calcestruzzo. I principali campi di applicazione degli additivi acceleranti di presa riguardano:

- i calcestruzzi destinati alle pavimentazioni industriali;
- i betoncini (applicati a spruzzo: *spritz-beton*) per la realizzazioni di rivestimenti provvisori in galleria finalizzati sia ad evitare la caduta di materiale dalle pareti di scavo, onde a salvaguardare l'incolumità del personale di cantiere che bloccare le venute di acqua dalla roccia;

Nelle pavimentazioni industriali in calcestruzzo durante il periodo invernale, a seguito del rallentamento del processo di idratazione del cemento per effetto della bassa temperatura, inizio presa si verifica dopo 8-10 ore dal getto costringendo alle maestranze ad effettuare le operazioni per la realizzazione dello strato di usura durante il periodo notturno incidendo pesantemente sull'organizzazione del lavoro e quindi sui costi complessivi dell'opera. Quindi l'utilizzo di questi additivi acceleranti si rileva di particolare utilità per la possibilità di anticipare l'esecuzione dello strato di usura di qualche ora. Come si può notare, l'aggiunta di questi additivi a base di tiocianato di sodio e potassio utilizzati in percentuali tra il 2-3% rispetto alla massa del cemento determina un anticipo dei tempi di inizio/fine presa senza influenzare lo sviluppo delle resistenze meccaniche sia alle brevi che alle lunghe stagionature. Una buona fetta della produzione di questi additivi avviene nel confezionamento di calcestruzzi applicati a spruzzo (*gunite*) sulle pareti dello scavo in galleria laddove si richiede che il materiale abbia una presa istantanea che ne favorisca l'adesione della roccia anche in presenza di consistenti venute d'acqua. L'additivo accelerante di presa per "guinaggio" più comune è costituito da silicato di sodio

generalmente utilizzato in misura variabile tra l'8 e il 15% rispetto alla massa del cemento; l'aggiunta di tale additivo proprio per la capacità di determinare una presa istantanea, viene effettuata nella parte terminale della lancia dall'operatore addetto alla proiezione del conglomerato.

3.4.5. Gli additivi acceleranti di indurimento

Gli additivi acceleranti di indurimento consentono attraverso un incremento del grado di idratazione del calcestruzzo di favorire un più rapido sviluppo delle resistenze meccaniche a compressione soprattutto alle basse temperature ambientali. L'effetto accelerante dell'additivo sulle resistenze meccaniche a compressione del calcestruzzo, tuttavia, si esaurisce già dopo qualche giorno (7giorni) e alle lunghe stagionature può anche determinare una diminuzione delle resistenze meccaniche a compressione rispetto all'impasto non additivato. I prodotti attualmente disponibili in commercio sono costituiti da sostanze quali nitrati, formiati e tritanolammina impiegati a dosaggi dell'1-2% circa sulla massa del cemento che consentono di aumentare la resistenza a compressione nelle primissime ore-giorni che seguono il getto del calcestruzzo accelerando la cinetica di idratazione sia dei silicati che degli alluminati, riducendo così anche i tempi di presa. Questa tipologia di additivo nella terminologia di cantiere vengono spesso individuati con il termine, sebbene improprio in quanto non modificano la temperatura di congelamento dell'acqua presente all'interno del calcestruzzo, di additivi *antigelo*.

3.4.6. Gli additivi fluidificanti e superfluidificanti

I *fluidificanti* (o riduttori d'acqua) e i *superfluidificanti* (o riduttori di acqua ad alta efficacia) rappresentano sicuramente gli additivi per il calcestruzzo più diffusi e massicciamente impiegati nel settore della tecnologia del calcestruzzo. La norma prevede accanto alle due categorie principali fluidificanti/superfluidificanti tre categorie di prodotti distinti in base alle influenze esercitate sui tempi di presa e di indurimento:

- *fluidificanti ritardanti*
- *fluidificanti acceleranti*

- *superfluidificanti ritardanti*

La famiglia di additivi fluidificanti/superfluidificanti comprende una larghissima varietà di polimeri organici naturali o di sintesi solubili in acqua riconducibili, tuttavia, a quattro famiglie principali:

- derivati del *ligninsolfonato* (residuo dell'estrazione della cellulosa dal legno)
- derivati del *naftalensolfonato* condensato con formaldeide; (*Poli-naflaten-solfonati*)

PNS

- derivati della *melammina solfonata* condensata con formaldeide; (*Poli-melammin-solfonati*) **PMS**
- *polimeri carbossilasi* vengono individuati con il termine di “*acrilici*”; (poliacrilati o policarbossilati) **PC**

Da un punto di vista prestazionale i superfluidificanti a base di **PC** sono capaci di fluidificare il calcestruzzo molto di più che non quelli a base di gruppi solfonici (PNS o PMS), inoltre i superfluidificanti policarbossilici conservano meglio la lavorabilità durante il trasporto in climi caldi. In linea di massima la quantità di additivo impiegata, rispetto alla massa del cemento si aggira fra lo 0,2-0,5% per i *fluidificanti* e lo 0,6-2% per i *superfluidificanti*, ovviamente diminuendo o aumentando l'additivo si riduce o si incrementa l'effetto dell'additivo. A seconda del modo di impiego, il calcestruzzo con superfluidificante può presentare rispetto al corrispondente calcestruzzo privo di additivo, determinati miglioramenti prestazionali. I possibili modi di impiego sono tre e si potrebbe dire che si tratta delle “*tre facce della stessa medaglia*”:

- a) a pari composizione del calcestruzzo;**
- b) con riduzione di acqua e di rapporto a/c** (a pari cemento e lavorabilità);
- c) con riduzione di acqua e cemento** (a pari rapporto a/c e lavorabilità);

a) Aggiunta del superfluidificante a pari composizione del calcestruzzo

Questa modalità di impiego (1 faccia della stessa medaglia) consiste nell'aggiungere l'additivo ad una miscela cementizia senza alcuna modifica nella composizione ed in particolare del rapporto acqua-cemento (a/c). Sostanzialmente questa modalità di utilizzo

dell'additivo consente di passare da una consistenza S1 (terra umida) in un calcestruzzo a consistenza superfluida S5 (superfluida) a seguito dell'aggiunta di un superfluidificante senza modifica della composizione.

b) Aggiunta del superfluidificante a pari lavorabilità *con riduzione di acqua e rapporto a/c*

Se è vero che l'additivo superfluidificante fa aumentare la classe di consistenza si può immaginare di aggiungere l'additivo e contemporaneamente di ridurre l'acqua di impasto in modo da lasciare immutata la lavorabilità, in sostanza si approfitta del potere fluidificante dell'additivo per *ridurre l'acqua di impasto a pari lavorabilità* (2 faccia della stessa medaglia). In linea di massima, con un dosaggio dell'1% di additivo su può ridurre l'acqua del 20-30% con conseguente diminuzione del rapporto a/c a pari cemento e lavorabilità del calcestruzzo.

c) Aggiunta del superfluidificante a pari lavorabilità ed a pari rapporto a/c *con riduzione di acqua e cemento*

La terza faccia della stessa medaglia è in realtà una combinazione delle due precedenti e cioè utilizziamo l'additivo in modo da diminuire non solo l'acqua d'impasto ma anche il cemento a pari lavorabilità e rapporto a/c. Molto spesso, tuttavia, questa modalità di impiego del riduttore d'acqua è finalizzata a ridurre il contenuto di cemento, non tanto per motivi di carattere economico, quanto per ridurre lo sviluppo del calore a seguito della reazione esotermica di idratazione del cemento con l'acqua o per incrementare il volume di inerte al fine di attenuare le contrazioni da ritiro igrometrico con l'intento di minimizzare il quadro fessurativo delle strutture.

3.4.6.1. Meccanismi di azione degli additivi fluidificanti/superfluidificanti

L'aumento di fluidità del calcestruzzo determinato dall'aggiunta degli additivi fluidificanti/superfluidificanti è ascrivibile

all'effetto

disperdente

esercitato

nei

confronti degli

ammassi particellari

(floculi) di cemento

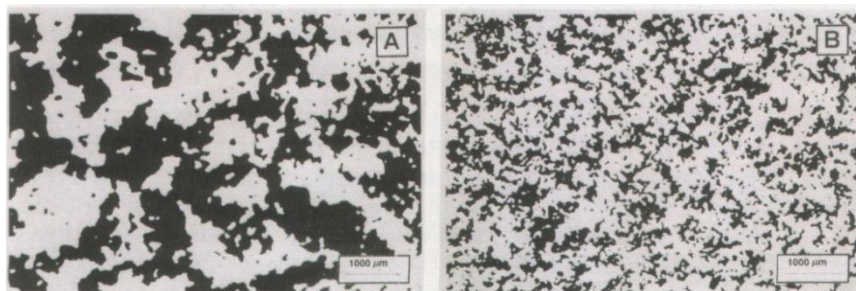


Figura 3.21 Osservazione al microscopio ottico di una pasta di cemento flocculata (A) e dispersa (B) per la presenza di additivo superfluidificante

che si formano subito dopo il mescolamento del legante con l'acqua. Le particelle di cemento in sospensione nell'acqua d'impasto tendono ad attrarsi formando agglomerati di dimensioni molto superiori al diametro medio dei granuli, questo fenomeno noto come **flocculazione** (fig.3.21) deriva dall'attrazione di natura elettrostatica tra i vari granuli di cemento a seguito delle cariche elettrostatiche di segno opposto che si sono formate sulle superfici dei granuli per effetto della macinazione durante il processo produttivo del cemento. In questo processo di agglomerazione parte dell'acqua viene intrappolata all'interno dei floculi con il risultato di ridurre l'acqua libera disponibile per fluidificare la pasta cementizia. In presenza degli additivi fluidificanti/superfluidificanti questi floculi vengono disaggregati noto come **effetto de flocculante** (fig.3.21) favorendo sia la liberazione dell'acqua intrappolata all'interno degli ammassi particellari che l'ottenimento di un sistema disperso costituito da agglomerati di minori dimensioni capaci di compattarsi meglio e lubrificare lo scorrimento viscoso della pasta cementizia .

In presenza dei superfluidificanti, i diversi granuli sono *deflocculati*, cioè dispersi a seguito di uno dei due possibili meccanismi:

- **adsorbimento** sulla superficie dei granuli di cemento delle molecole di superfluidificante e formazione di cariche elettrostatiche dello stesso segno (negative) apportate dai gruppi anionici dei

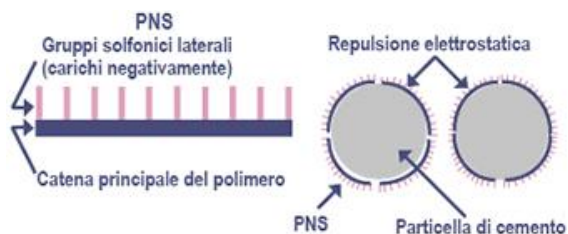


Figura 3.22 Deflocculazione per repulsione elettrostatica

superfluidificanti *PNS* e *PMS* che provoca una **repulsione elettrostatica** tra i granuli di cemento (fig.3.22).

- **adsorbimento** sulla superficie dei granuli di cemento delle molecole di superfluidificante *PC* che, grazie alla ingombrante presenza delle catene laterali, impedisce ai granuli di cemento di avvicinarsi a causa dell'**impedimento sterico**.

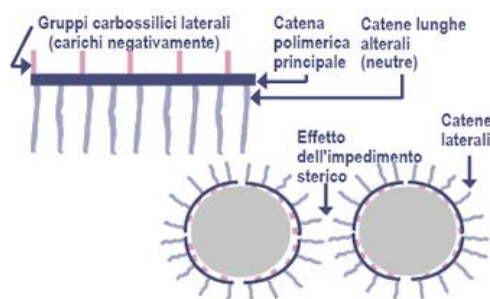


Figura 3.23 Deflocculazione per impedimento sterico

La prevalenza del meccanismo di repulsione elettrostatica o di quello sterico sull'effetto disperdente dipende sia dalla natura che dal peso molecolare dell'additivo:

- nei polimeri di ligninsolfonato, naftalensolfonato e melammina solfonata prevale l'effetto di *repulsione elettrostatica* per la presenza nella catena polimerica di gruppi (PNS o PMS) con carica elettrica negativa (fig.3.22).
- nei polimeri di tipo acrilico, invece, è predominante la repulsione per effetto sterico in particolar modo in quei polimeri caratterizzati da lunghe catene laterali neutre per il ritorno apporto di cariche elettriche negative del gruppo carbossilico laterale

(COO-) legato ad unità monometriche a carattere neutro che sono prevalenti (fig.3.23).

Gli additivi acrilici, a pari dosaggio, posseggono un potere disperdente maggiore rispetto ai prodotti a base di naftalensolfonato o melammina ecc. All'incirca per ottenere una riduzione d'acqua del 20% occorre una percentuale di additivo acrilico pari al 0,8%, mentre la stessa riduzione si ottiene impiegando l'1,2% di un superfluidificante a base di naftalensolfonato o melammina ecc. Le prestazioni dell'additivo sono, inoltre, fortemente influenzate anche dal tipo di cemento impiegato, infatti, per un naftalensolfonato o melammina è indipendente dal tipo di cemento rispetto ad un acrilico mostrando un evidente variazione dell'effetto disperdente non solo con il tipo di cemento ma anche dalle variazioni di composizione che uno stesso cemento può subire durante l'arco dell'anno.

3.4.6.2. Vantaggi degli additivi fluidificanti/superfluidificanti

L'impiego degli additivi fluidificanti/superfluidificanti ha rivoluzionato il mondo delle costruzioni in c.a e c.a.p. E' possibile, infatti, a seconda della modalità di impiego:

- 1) migliorare la lavorabilità e l'affidabilità delle strutture in opera (a pari rapporto a/c);
- 2) aumentare la R_{ck} e durabilità riducendo l'acqua e quindi il rapporto a/c (a pari lavorabilità);
- 3) ridurre il ritiro igrometrico, il gradiente termico e la deformazione viscosa riducendo sia l'acqua che il cemento (a pari rapporto a/c e lavorabilità);

3.4.7. Gli additivi aeranti

Gli additivi aeranti modificano le prestazioni del calcestruzzo in servizio migliorandone la resistenza al ghiaccio. Gli additivi aeranti, aggiunti in quantità piccolissima (0,04-0,06% sul peso del cemento) modificano la tensione

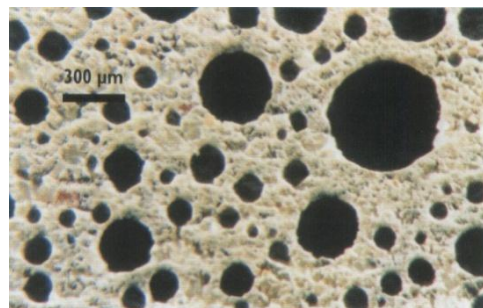


Figura 3.24 Osservazione al microscopio ottico di microbolle (100-300 μm) d'aria inglobata nella malta che coinvolge gli aggregati grossi

superficiale dell'acqua (e per questo sono detti anche *tensioattivi*), cosicchè per effetto

dell'agitazione meccanica nella miscelazione del calcestruzzo si formano micro bolle d'aria con diametro di circa 100-300μm (fig.3.24). Quindi la formazione delle bolle d'aria è dovuta ad un fenomeno fisico, come quello che provoca la formazione di schiuma allorquando si agita acqua in presenza di detersivi, anch'essi prodotti *tensioattivi* ancorchè di tipo diverso rispetto agli additivi aeranti. Un'azione collaterale, ma benefica, degli additivi aeranti consiste nella riduzione di circa il 5% nell'acqua d'impasto per ottenere una determinata lavorabilità. D'altra parte occorre tener conto che la presenza delle bolle d'aria comporta una penalizzazione nelle resistenza meccanica (-20% con un 4% di aria) alla quale si può far fronte riducendo il rapporto a/c. Ciò comporta, in pratica, che a pari R_{ck} un calcestruzzo aerato (resistente al gelo) richiede circa 30Kg/m^3 i più di cemento rispetto al corrispondente calcestruzzo non aerato. Il maggior costo del calcestruzzo aerato (non solo per l'agente aerante e per i 30Kg/m^3 di cemento, ma anche per la maggior cura richiesta nel controllo dell'aria inglobata) è largamente ricompensato dalla maggiore durabilità (in classe XF della UNI EN 206-1) e quindi dai minori costi manutentivi in servizio.

3.5. LE AGGIUNTE POZZOLANICHE NEL CALCESTRUZZO

I materiali pozzolanici oltre ad essere impiegati nella produzione dei cementi comuni vengono diffusamente impiegati anche direttamente in centrale di betonaggio per la produzione del calcestruzzo. Questa modalità di impiego offre il vantaggio, rispetto all'utilizzo dei cementi Portland di miscela o dei cementi tipo III, IV e V dove la percentuale di materiale pozzolanico viene fissata dal produttore, di poter modulare il dosaggio di queste aggiunte nell'impasto in relazione alle specifiche prestazioni che si vogliono conferire nel calcestruzzo. Le aggiunte impiegate in centrale di betonaggio previste dalla *UNI-EN 206-1* come aggiunte **tipo II**, sono costituite dalla **cenere volante** e dal **fumo di silice**. Non viene impiegata in Italia, invece, la **loppa d'altoforno** la quale è quasi esclusivamente utilizzata nella produzione del cemento e, in forma di loppa premacinata, per la realizzazione dei rilevanti nel settore stradale. Analizziamo del dettaglio questi tre ingredienti:

3.5.1. Loppa d'altoforno

La loppa di origine industriale (scoria nella lavorazione dell'acciaio), purchè raffreddata rapidamente allo stato vetroso, presenta la peculiare caratteristica rispetto alla pozzolana di poter indurire sia pur lentamente, se finemente macinata e mescolata con acqua, anche in assenza di calce. Ovviamente i leganti, per esempio, con 15% o 90% di loppa non saranno prestazionalmente equivalenti, soprattutto nella resistenza meccanica alle brevi stagionature dove il contributo della loppa (lenta a indurire) è modesto e rimane, quindi, solo quello apportato dal clinker di cemento Portland. Per quanto attiene alle prestazioni dei calcestruzzi con cemento d'altoforno, esse assomigliano a quelle già descritte per i conglomerati con cemento pozzolanico: in particolare, il calore d'idratazione del cemento d'altoforno può risultare ancor più basso rispetto a quello che sviluppa nel cemento pozzolanico necessariamente più ricco di clinker per l'esigenza di un maggior contenuto di calce necessaria all'attivazione della pozzolana. La loppa d'altoforno macinata costituisce un materiale fine reattivo con basso calore d'idratazione. La loppa d'altoforno è già presente in alcuni cementi CEM II e CEM III ma è pure disponibile come aggiunta in

alcuni Paesi e può essere impiegata nell'impianto di miscelazione. Un alto dosaggio in loppa può influenzare la stabilità del SCC, portando a una riduzione della robustezza con problemi nel controllo della consistenza, mentre il rallentamento della presa può anche portare a un aumento del rischio di segregazione. La loppa d'altoforno macinata è disponibile in alcuni Paesi come aggiunta di tipo I.

3.5.2. Cenere volante

Almeno in Italia la cenere volante può ormai essere considerata un ingrediente di routine per la produzione del calcestruzzo essendo utilizzata in centrale di betonaggio da circa un ventennio. Nei primi periodi l'utilizzo era quasi esclusivamente finalizzato al miglioramento della pompabilità di calcestruzzi magri con bassi dosaggi di cemento;

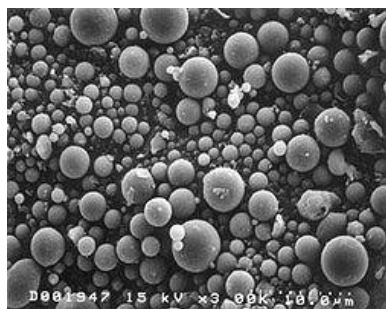


Figura 3.25 Particelle di cenere volante viste al microscopio ottico

successivamente, il suo impiego è stato, invece, dettato dalla possibilità offerta dal materiale pozzolanico di poter migliorare alcune prestazioni del conglomerato rispetto a quelle di impasti confezionati con solo cemento. La cenere volante si presenta in forma di particelle pressochè sferiche (5-90µm) (fig.3.25), piene o più spesso cave, capaci di favorire, proprio per la loro forma tondeggiante, la lavorabilità dei calcestruzzi, oltre che la pozzolanicità

dei cementi. La cenere disponibile è solitamente quella di tipo siliceo proveniente dalla combustione dei carboni bituminosi, mentre è di fatto disponibile solo in pochi paesi (per esempio Grecia) quella di tipo calcico residuo della combustione delle ligniti o dei carboni sub-bituminosi. La cenere volante per essere impiegata nel calcestruzzo (come aggiunta tipo II prevista dalla UNI-EN 206-1 al punto 5) deve essere conforme alla **UNI EN 450** richiamata dalle NTC 2008 al capitolo 11 paragrafo 2.9.3.. La UNI EN 206-1 consente di tener conto di parte della cenere introdotta nella miscela per la valutazione del rapporto a/c e del dosaggio di cemento minimo previsti dalla stessa norma per ciascuna classe di esposizione. A tale scopo viene introdotto il concetto di k. L'applicazione del concetto del

coefficiente K per le ceneri conformi alla UNI EN 450, è ammessa per i tipi di cemento conformi alla UNI EN 197-1 per i quali sono disponibili dati sperimentali riportati nella tabella 3.5.2. Utilizzando, nel mix- design del calcestruzzo, un determinato quantitativo di cenere volante caratterizzata da un certo valore di k (fornito dalla normativa), è possibile utilizzare i seguenti valori di dosaggio di cemento e rapporto acqua/cemento:

Tabella 3.5.2 (valori di K per ceneri volanti conforme alla UNI EN 450)

Tipo di cemento	Classi di resistenza	Valori di K
CEM I	32,5 N,R	0,2
CEM I	42,5 N,R	0,4
	52,5 N,R	
CEM II A	32,5 N,R	0,2
	42,5 N,R	
CEM III A	32,5 N,R	0,2
	42,5 N,R	
CEM IV A	32,5 N,R	0,2
	42,5 N,R	
CEM V A	32,5 N,R	0,2
	42,5 N,R	

- Il rapporto a/c può essere sostituito con uno equivalente:

$$(a/c)_{eq} = \frac{a}{(c_{eff} + K_{cv} \cdot c_v)} \quad \text{dove:}$$

- a è l'acqua d'impasto;
 - c_{eff} è il cemento effettivo d'impasto;
 - K_{cv} è il coefficiente di omogeneizzazione o fattore di equivalenza a cemento il quale afferma che 1Kg di cenere volante equivale a circa 0,2-0,4 Kg di cemento;
 - c_v è il quantitativo di cenere volante introdotto nell'impasto;
- Il dosaggio di cemento può essere diminuito (in funzione della classe di esposizione ambientale) della seguente quantità:

$$\Delta_c = (\text{dosaggio min di cemento} - 200) \cdot K_{cv}$$

dove *dosaggio min di cemento* fa riferimento al valore previsto dalle UNI EN 206-1 e UNI EN 11104 per le varie classi di esposizione. Ovviamente la quantità (cemento + $K_{cv} \cdot$

cenere volante) utilizzata non deve essere minore del dosaggio minimo richiesto per le varie classi di esposizione. La quantità massima di ceneri che può essere considerata (agli effetti del concetto del valore K_{cv}) deve soddisfare il seguente requisito:

$$(\text{ceneri volanti} / \text{cemento}) \leq 0,33$$

Se la quantità di ceneri volanti che viene utilizzata è maggiore, l'eccesso non deve essere considerato per il calcolo del rapporto acqua/(cemento + K_{cv} * ceneri volanti).

Le prestazioni del calcestruzzo con cenere volante possono subire miglioramenti oppure penalizzazioni a seconda della qualità della cenere volante impiegata e in funzione delle modalità di impiego. Relativamente a quest'ultimo aspetto la cenere volante e, in generale, tutte le aggiunte di tipo II in accordo alle EN 206, possono essere utilizzate:

- in **sostituzione di parte del cemento** lasciando invariato il rapporto acqua/cemento equivalente, $(a/c)_{eq}$, derivante dalle esigenze meccaniche e di durabilità dell'impasto;
- in **aggiunta al cemento** (sostituendo, quindi parte della sabbia) con una conseguente diminuzione del rapporto $(a/c)_{eq}$;

L'utilizzo della cenere volante in *aggiunta al cemento*:

- non modifica i tempi di presa dell'impasto di solo cemento;
- non modifica lo sviluppo di calore e conseguentemente i gradienti termici nei getti massivi;
- non modifica le prestazioni meccaniche a 1-3 giorni le quali, invece, risultano alle stagionature successive (7-28 giorni) maggiori di quelle dell'impasto di solo cemento;
- la durabilità del calcestruzzo nei confronti delle sollecitazioni aggressive ambientali migliora sia per la maggiore impermeabilità derivante dal minor rapporto $(a/c)_{eq}$ che per il minor contenuto di idrossido di calcio nella matrice cementizia impegnato nella reazione pozzolanica con la cenere volante.

L'utilizzo della cenere volante in *sostituzione di parte del cemento*:

- determina un allungamento dei tempi di presa rispetto all'impasto di solo cemento, per cui vengono raramente impiegati nel settore delle pavimentazioni industriali in quanto l'allungamento dei tempi di presa costringerebbe ad una maggiore attesa per poter realizzare lo strato di spolvero e pastina;
- consente di ridurre lo sviluppo di calore e, conseguentemente, i gradienti termici nei getti massivi;
- produce una riduzione delle resistenze meccaniche a compressione alle brevi stagionature rispetto a quelle dell'impasto di solo cemento.
- permette di conseguire alle lunghe stagionature resistenze a compressione sostanzialmente equivalenti a quelle dell'impasto di solo cemento;
- garantisce una maggiore durabilità nei confronti della reazione alcali-aggregato, della penetrazione del cloruro e dell'attacco solfatico. Le resistenze alla penetrazione dell'anidride carbonica, invece, diminuisce per i calcestruzzi scadenti e non migliora per quelli con rapporti a/c inferiori a 0,50.

L'impiego di cenere in aggiunta o in sostituzione del cemento determina rispettivamente nessuna modifica o un leggero miglioramento in termini di mantenimento della lavorabilità del calcestruzzo durante il trasporto. Si è dimostrato che le ceneri volanti sono un'aggiunta efficiente per il SCC. Esse portano ad un aumento della coesione e a una riduzione della suscettibilità ai cambiamenti nel tenore in acqua. Tuttavia, alti livelli di ceneri volanti possono portare a una fase pastosa talmente coesiva da opporre resistenza alla facilità di scorrimento.

3.5.3. Fumo di silice

Questo materiale è una polvere di scarto ottenuta dai processi di produzione del Silicio e delle leghe Ferro-Silicio e costituisce, quando viene aggiunto agli impasti cementizi, un componente che esplica una funzione di filler ed una funzione pozzolanica. Queste due azioni si collocano ad un livello di efficacia più elevato rispetto a quello dei materiali finora conosciuti, così da rendere interessante il loro studio ed il loro sfruttamento. Si tratta di una polvere costituita da particelle di silice provenienti dalla condensazione di un fumo

nei forni di riduzione della quarzite per la produzione di silicio metallico o sue leghe ferrosiliceo. Alla temperatura di reazione di 2000 °C questo fumo, lasciando i forni, viene bruscamente raffreddato a 200 °C e non ha il tempo di reintegrare una fase cristallina, dando quindi origine ad una tipica struttura amorfa ($2SiO + O_2 = SiO_2 = \text{Biossido di silicio}$). La polvere così ottenuta viene abbattuta con opportuni impianti di filtrazione e immagazzinata in silos (Fig.3.26).

Peso Specifico delle Particelle	2,1 -2,4 kg/dm ³
Peso in mucchio	0,25-0,30 kg/dm ³
Superficie Specifica	20-30 m ² /g (200-300 *10 ³ Blaine)
Dimensioni delle particelle	0,01 – 0,5 µm (micron)

Tabella 3.5.3.: Caratteristiche del Fumo di Silice

Mediante la superficie specifica della microsilice si aggira attorno ai 20-30 m²/g a differenza di un cemento Portland di 0.3-0.4 m²/g (3000-4000 Blaine) (Tabella 3.5.3.). Tuttavia, avendo la tendenza ad agglomerare, usualmente la distribuzione media delle particelle di microsilice è tra 1 e 100 µm di diametro. Per quanto riguarda la chimica, l’ossido prevalente è SiO₂ (superiore al 90%), mentre gli altri ossidi contenuti sono variabili. Rispetto alla cenere volante, il fumo di silice, per il maggior contenuto di SiO₂, per la maggiore finezza e per la totale assenza di composti cristallini a bassa reattività, possiede caratteristiche pozzolaniche migliori.

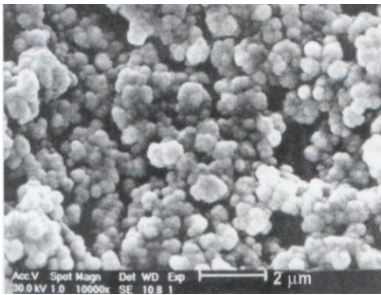


Figura 3.26 Particelle di fumo di silice viste al microscopio ottico

Il ruolo che svolge il fumo di silice nella matrice cementizia può essere sintetizzato secondo tre processi di tipo fisico-chimico:

- 1) riduzione della dimensione dei pori e densificazione della matrice: le micro particelle, grazie alla loro struttura amorfa, riempiono i vuoti interstiziali tra i granuli di cemento, formando così un sistema compatto e addensato e lasciando un volume molto piccolo a disposizione dell’acqua (il cosiddetto filler effect) ;
- 2) reazione con la calce libera, creando gel di C-S-H maggiormente resistente **3.4** ;

- 3) miglioramento della zona di interfaccia (*zona di transizione*) tra pasta di cemento e aggregati (fig.3.27), riducendone lo spessore e il grado di orientamento dei cristalli di portlandite (CH) in essa presenti; l'eliminazione o quasi della zona di transizione e l'affinamento dei pori, determinano un significativo incremento della resistenza meccanica a compressione e la netta diminuzione della permeabilità.

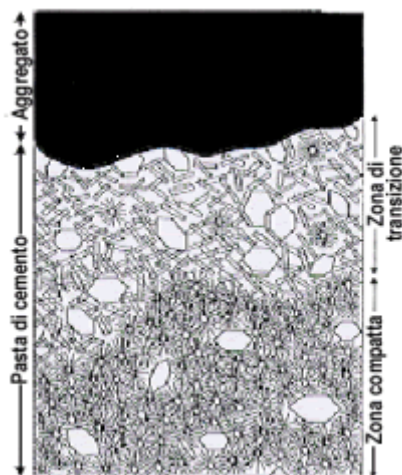
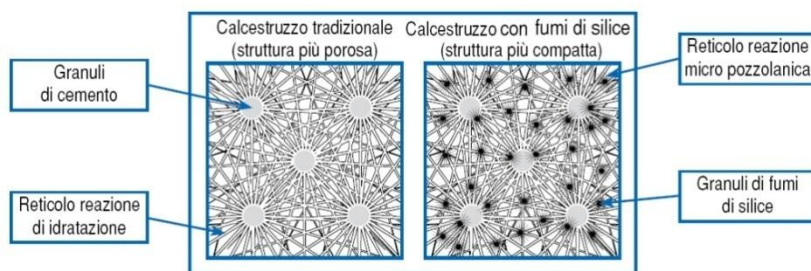


Fig. 3.27 Zona di Transizione pasta di cemento-aggregati

- 4) diminuzione drastica dell'essudamento dell'acqua (bleeding) sia esterno che interno.

Poiché il fumo di silice è un sottoprodotto dell'industria del silicio, esso è reperibile a costi relativamente bassi solo nelle aree in cui l'energia elettrica, fonte primaria per la produzione del silicio, è disponibile in grandi quantità (USA, URSS, Norvegia ecc.). Inoltre, dato il basso peso specifico in mucchio, i costi di trasporto hanno un'incidenza molto elevata sul prezzo finale del materiale. Tuttavia, per l'elevato costo, esso viene utilizzato in centrale di betonaggio solo in casi eccezionali per la produzione di calcestruzzi speciali allorquando si richiede un'elevata impermeabilità, calcestruzzi ad alta ed altissima resistenza meccanica a compressione, calcestruzzi autocompattanti ed infine nei calcestruzzi proiettati per via umida.

Il fumo di silice si presenta in forma di microsfele con dimensioni prevalentemente al di sotto di $0,1\ \mu\text{m}$, e quindi capaci di allocarsi negli interstizi tra i granuli di cemento (1-



50 μm)

Figura 3.28 Differenza fra un calcestruzzo tradizionale ed uno con fumi di silice

(fig.3.28).

Tuttavia, la elevata finezza del fumo di silice non ne consente una percentuale d'impiego maggiore del 10% nel cemento per il conseguente aumento nella richiesta d'acqua d'impasto di fatto il fumo di silice è abbinato ad un superfluidificante per compensare la eccessiva richiesta d'acqua. Il fumo di silice per essere impiegato nel calcestruzzo (come aggiunta tipo II prevista dalla UNI-EN 206-1 al punto 5) deve essere conforme alla **EN 13263:1998**, come previsto dalle NTC 2008 al capitolo 11 paragrafo 2.9.3.. L'applicazione del concetto del coefficiente K per il fumo di silice invece, è ammessa per i tipi di cemento conformi alla UNI EN 197-1 per i quali sono disponibili i seguenti dati forniti dalla UNI-EN 206-1:

- per un rapporto $(a/c) \leq 0,45$ **K=2**;
- per un rapporto $(a/c) > 0,45$ **K=2** eccetto le quali **K=1** per le classi di esposizione XC e XF;

E' possibile per un determinato quantitativo di fumo di silice, caratterizzata da un certo valore di k (fornito dalla normativa) ,utilizzare i seguenti valori di dosaggio di cemento e rapporto acqua/cemento:

- Il rapporto a/c può essere sostituito con uno equivalente:

$$(a/c)_{eq} = \frac{a}{(ceff + Kfs*fs)} \quad \text{dove:}$$

- a è l'acqua d'impasto;
 - c_{eff} è il cemento effettivo d'impasto;
 - K_{fs} è il coefficiente di omogeneizzazione o fattore di equivalenza a cemento il quale afferma che 1Kg di fumo di silice equivale a 2 Kg di cemento per i calcestruzzi con rapporto a/c inferiore a 0,45 e per tutti quelli che indipendentemente dal rapporto a/c sono destinati a strutture in classe di esposizione diverse dalla XC e XF.
 - f_s è il quantitativo di fumo di silice introdotto nell'impasto;
- Il dosaggio di cemento può essere diminuito (in funzione della classe di esposizione ambientale) della seguente quantità:

$$\Delta_c = (\text{dosaggio min di cemento} - 200) * K_{fs}$$

Il dosaggio di cemento non deve essere diminuito più di 30 kg/m^3 per calcestruzzi in classe di esposizione per le quali il dosaggio minimo di cemento è $\leq 300 \text{ kg/m}^3$. Ovviamente la quantità (cemento + $K_{fs} * \text{fumo di silice}$) utilizzata non deve essere minore del dosaggio minimo richiesto per le varie classi di esposizione. La quantità massima di fumi di silice che può essere considerata (agli effetti del concetto del valore K_{fs}) deve soddisfare il seguente requisito:

$$(\text{fumi di silice / cemento}) \leq 0,11$$

Se la quantità di fumi di silice che viene utilizzata è maggiore, l'eccesso non deve essere considerato agli effetti del concetto del valore di k . Con percentuali maggiori di fumo di silice si assiste ad una decrescita delle proprietà meccaniche, ciò è dovuto al fatto durante le reazioni pozzolaniche viene utilizzata gran parte della portlandite (CH) presente all'interno della miscela, e quindi le restanti polveri rimarrebbero inutilizzate, provocando una caduta nelle resistenze a compressione.

Relativamente a quest'ultimo aspetto il fumo di silice, in generale, tutte le aggiunte di **tipo II** in accordo alle EN 206, possono essere utilizzate:

- in **sostituzione di parte del cemento** lasciando invariato il rapporto acqua/cemento equivalente, $(a/c)_{eq}$, derivante dalle esigenze meccaniche e di durabilità dell'impasto;
- in **aggiunta al cemento** (sostituendo, quindi parte della sabbia) con una conseguente diminuzione del rapporto $(a/c)_{eq}$;

L'utilizzo del fumo di silice in *aggiunta al cemento*:

- non modifica i tempi di presa dell'impasto di solo cemento;
- incrementa lo sviluppo di calore e conseguentemente i gradienti termici nei getti massivi;
- migliora, sia pur lievemente, le prestazioni meccaniche già dopo 1 giorno rispetto a quelle dell'impasto di solo cemento;
- incrementa in maniera significativa le resistenze meccaniche alle stagionature successive (3-28 giorni) rispetto all'impasto di solo cemento;
- la durabilità del calcestruzzo nei confronti delle sollecitazioni aggressive ambientali migliora sia per la maggiore impermeabilità derivante dal minor rapporto $(a/c)_{eq}$ che per il minor contenuto di idrossido di calcio impegnato nella reazione pozzolanica.

L'utilizzo del fumo di silice in *sostituzione di parte del cemento*:

- determina un allungamento dei tempi di presa rispetto all'impasto di solo cemento;
- consente di ridurre lo sviluppo di calore e, conseguentemente, i gradienti termici nei getti massivi, anche se per questo scopo è più conveniente dal punto di vista economico ricorrere all'impiego della cenere volante;
- produce una riduzione modesta delle resistenze meccaniche a compressione a 1 giorno rispetto a quella dell'impasto di solo cemento;
- permette di eguagliare già dopo 3 giorni la resistenza a compressione del calcestruzzo di solo cemento e alle stagionature successive di superarla;

- garantisce una maggiore durabilità nei confronti della reazione alcali-aggregato, della penetrazione da cloruro e dell'attacco solfatico;

Tra le maggiori potenzialità del fumo di silice, infine, si deve menzionare quella di confezionare calcestruzzi ad alta ad altissima resistenza meccanica a compressione grazie alla possibilità di ricorrere a superdosaggi di additivo superfluidificante rispetto a quelli tradizionalmente impiegati per i conglomerati convenzionali senza generare apprezzabili ritardi nei tempi di presa e di indurimento del conglomerato cementizio.

4 SPERIMENTAZIONE:

4.0 Premessa

Secondo il D.M. 14.01.2008 la **durabilità** o **durevolezza** è definita come: “*conservazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali (quali il calcestruzzo) e delle strutture, proprietà essenziale affinché i livelli di sicurezza vengano mantenuti durante tutta la vita dell'opera*”.

La **durabilità del materiale** è funzione della capacità di quest'ultimo a durare nel tempo resistendo alle azioni aggressive dell'ambiente in cui si trova. La durabilità del calcestruzzo è strettamente legata alla *permeabilità*; un calcestruzzo con un'elevata permeabilità è sinonimo di una scarsa durabilità, poiché con l'acqua penetrano potenziali agenti aggressivi (solfati, cloruri, alcali, ecc).

Una tipologia di calcestruzzo che riduce di molto la permeabilità è l'S.C.C. (*Self-Compacting-Concrete*), in quanto grazie alle sue proprietà reologiche riempie completamente i casseri eliminando i macrovuoti e l'aria in eccesso all'interno della matrice cementizia. Questo evita l'insorgere dei macrodifetti del calcestruzzo che sono la causa dell'abbattimento delle sue proprietà meccaniche e del suo grado di durabilità.

Per incrementare la resistenza alla permeabilità ed all'attacco chimico del calcestruzzo, è necessario ridurre la *porosità capillare* della matrice cementizia, mediante: l'utilizzo di un basso rapporto a/c, stagionare il calcestruzzo in ambiente umido, ed irrigidire la matrice cementizia con l'utilizzo di *cementi o filler ad attività pozzolanica*.

L'attività pozzolanica di un materiale, è funzione della Silice contenuta, a reagire con l'idrossido di calcio CH presente nella miscela, per ottenere un composto più fibroso e meccanicamente più resistente. I materiali a comportamento pozzolanico o ad attività pozzolanica sono sostanze naturali o sottoprodotti industriali (pozzolana industriali, ceneri volanti, fumi di silice) che hanno una struttura amorfa o parzialmente cristallina e sono costituiti da silice, da silico-alluminati o da una combinazione di questi. Il comportamento pozzolanico di un materiale, migliora con la purezza e la finezza della silice in essa contenuta, ragion per cui il *fumo di silice*, con una percentuale di Silice amorfa pura dell'ordine del 90-95% ed una finezza 100 volte inferiore a quella del cemento, possiede

un'ottima attività pozzolanica, rispetto alle pozzolane naturali contenente un basso contenuto di Silice dell'ordine del 20-40% ed una finezza grossolana (macinata).

Dalle considerazioni esplicate nel seguente paragrafo, l'intento della seguente sperimentazione è quello di confezionare un calcestruzzo autocompattante con aggiunta di fumo di silice, capace di ridurre le macro e micro porosità nel calcestruzzo, al fine di ottenere un calcestruzzo ad elevata durabilità e quindi a bassa permeabilità.

4.1 Obiettivi

L'obiettivo della sperimentazione consiste nell'esaminare l'influenza del Fumo di silice sulle caratteristiche reologiche allo stato fresco, e meccaniche allo stato indurito, di un calcestruzzo autocompattante (SCC: *Self-Compacting-Concrete*) facendo variare tre tipologie di legante cementizio. Le proprietà dell' SCC, con e senza fumo di silice, sono comprovate da test in laboratorio allo stato fresco (*Slump-flow, V Funnel, L box, U box, J ring, Aria %, Ph, Massa Volumica, T°*) e allo stato indurito (*Compressione, Trazione indiretta, Sonreb, Modulo Elastico Secante e Dinamico, Permeabilità all'acqua*) al fine di quantificarne le differenze.

4.2 Piano della Sperimentazione

La prima operazione verte nel definire le tipologie di *mix design* per l'autocompattante, che si differenziano l'uno dall'altro per il tipo di legante (*cemento*) e di aggiunta (*fumo di silice*) prevista. Per avere un confronto in termini di reologia e resistenza meccanica fra i mix design, si adottano i medesimi parametri:

- stesso rapporto **a/c** ;
- stessa **% d'impiego degli inerti** disponibili, ad eccezione dell'aggiunta di fumo di silice ;
- stessa **quantità d'acqua**, variando il quantitativo di additivo per la classe di cemento e fumo di silice, per non alterare la classe di lavorabilità;

Le classi di cemento adottate per la sperimentazione sono:

- Cemento Portland **CEM: I 52,5 R** (95÷100 % Clinker)
- Cemento Portland **CEM: II-A-LL 42,5 R** (80÷94 % Clinker, 6÷20% Calcare)
- Cemento Portland **CEM: II-A-LL 32,5 R** (80÷94 % Clinker, 6÷20% Calcare)

La scelta di utilizzare tre classi di cemento nella sperimentazione è dettata dal fatto di voler valutare l'efficienza in termini di resistenza meccanica, della singola classe di cemento, con l'aggiunta di fumo di silice; ovvero analizzare *l'attività pozzolanica* di un cemento di alta qualità (*I 52,5*) o bassa qualità (*II-A-LL 42,5*, *R II-A-LL 32,5 R*) con l'aggiunta di fumo di silice.

Le tipologie di *mix design* sono le seguenti:

Tipologie mix Design	a/c
1) I 52,5 R	0,525
2) I 52,5 R + 11% di fumo di silice	0,525
3) II-A-LL 32,5 R	0,525
4) II-A-LL 32,5 R + 11% di fumo di silice	0,525
5) II-A-LL 42,5 R	0,525
6) II-A-LL 42,5 R + 11% di fumo di silice	0,525



Il rapporto acqua/cemento prescelto per tutte le tipologie di mix design è pari a **0,525**, valutato come il *rapporto a/c medio* fra il massimo (0,6) e il minimo (0,45) previsto nelle classi di esposizione ambientale della UNI EN 206-1.

Inoltre per ogni mix sono stati effettuati due impasti da 35 litri di volume di autocompattante, necessari per confezionare i cubetti (15x15x15) ed effettuare test sulla lavorabilità.

I test da effettuare sul calcestruzzo autocompattante SCC per ogni tipologia di mix, si suddividono in test allo stato fresco e test allo stato indurito (distruttive/non distruttive).

- **Test su SCC allo stato fresco**

Test	N° Prove	Norma UNI
Slump flow	1	12350/8
V Funnel	1	12350/9
L Box	1	12350/10
U box	1	11044
J Ring	1	12350/12
T° (°C)	1	-
pH	1	-
Aria %	1	12350-7
Massa Volumica	1	12350-6

- **Test su SCC allo stato indurito**

Test	N° Prove	Tip.Test	Tipo cubetto	Norma UNI
Compressione	6	Distruttiva	15X15x15	12390/1-2-3-4-7
Trazione Indiretta (Brasiliana)	3+3	Distruttiva	15X15x15	12390-6
Sclerometriche + Ultrasuoni (SON-REB)	12	Non distruttiva	15X15x15	12504/2-4
Modulo Elastico Secante	3	Non distruttiva	15X15x15	6556:76
Profondità di penetrazione all'acqua sotto pressione	3	Distruttiva	15X15x15	12390-8
tot. Cubetti	12	-	15X15x15	-

Il numero di provini per il test di compressione rispetta il numero indicato dall'NTC 08 per la Valutazione **preliminare della miscela di calcestruzzo** con un controllo di accettazione *tipo A*.

Il numero di provini per il test di trazione indiretta (Brasiliana) è pari a sei, di cui 3 più i 3 cubetti che necessitano lo spacco per valutare la profondità di penetrazione all'acqua.

Il metodo Sonreb (Sclerometriche – Ultrasuoni) viene effettuato su tutti i 12 cubetti.

Il numero di test minimo per il calcolo del Modulo Elastico Secante è pari a 3, secondo la UNI 6556:76.

Il numero di test per la valutazione della penetrazione all'acqua sotto pressione è pari a 3, in quanto la UNI 12390-8 non fornisce accuratamente il minimo previsto.

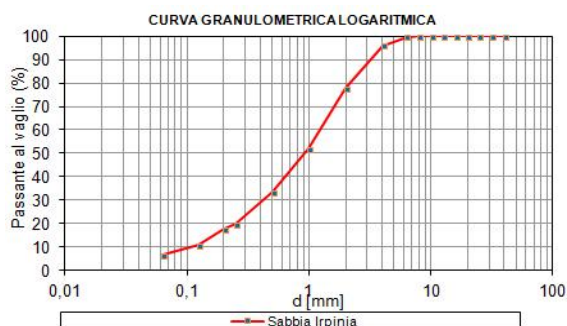
4.3 Scelta delle materie prime

La prima operazione eseguita è stata quella della scelta delle materie prime (provviste di marcatura CE) che costituisce il calcestruzzo autocompattante e sono: **inerti, cemento, additivo, aggiunte**. Analizziamo nel dettaglio ciascun costituente:

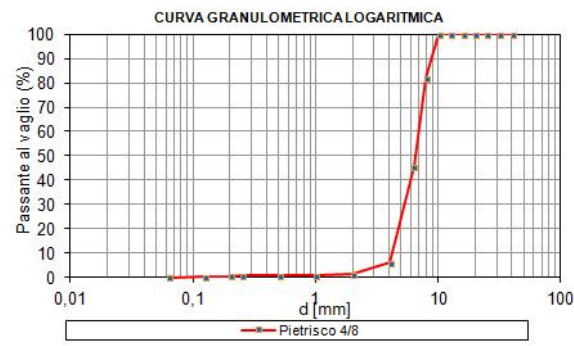
Inerte

Sono stati scelti tre tipologie di inerti, di cui:

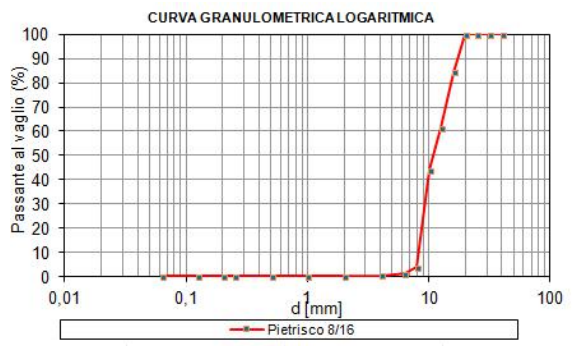
- **Sabbia 0/4** di natura calcarea, $M_f = 3.10$, $M_{Vol} = 2.69$, cava “Irpinia Calcestruzzi” di Avellino;



- **Pietrisco 4/8** di natura dolomitica, $M_f=6.08$, $M_{Vol.}= 2,71$, cava “Beton Cave” di Cava dè Tirreni (SA);



- **Pietrisco 8/16** di natura dolomitica, $M_f=7.09$, $M_{Vol.}= 2,71$, cava “Beton Cave” di Cava dè Tirreni (SA);



Cemento

Sono stati scelti due tipologie di cementi, di cui:

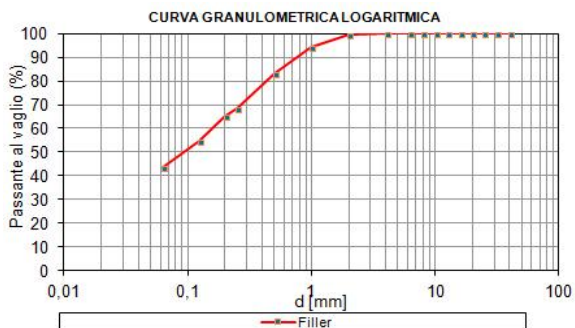
- **CEM: I 52,5** prodotto dalla Cementeria Costantinopoli dello stabilimento di Barile (PZ) ;
- **CEM: II-A-LL 32,5 R** “ “ “ “ “ “ “ “ “ “ “ “ “ “ “ “
- **CEM: II-A-LL 42,5 R** “ “ “ “ “ “ “ “ “ “ “ “ “ “ “ “

Additivo Superfluidificante

- **No.W.A.** additivo superfluidificante acrilico a base di polimero di acido poliacrilico non solfonato e completamente privo di formaldeide, prodotto dalla Sika Italia in Calusco d’Adda (BG);

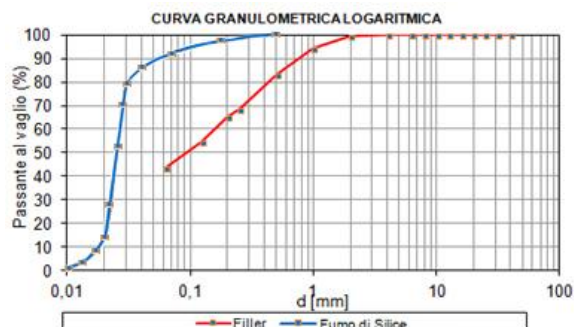
Aggiunte tipo I

- **Filler** di natura calcarea, $M_f = 1.0$, $M_{Vol.} = 2.69$, cava “Irpinia Calcestruzzi” di Avellino;



Aggiunte tipo II

- **Fumo di silice** prodotto dall'Axim Italia (Italcementi s.p.a.) nello Stabilimento di Monselice (PA);



4.4 Composizione del Mix design

La composizione della miscela è scelta in modo da soddisfare tutti i criteri prestazionali per il calcestruzzo sia allo stato fresco che per quello indurito. Le indicazioni riportate nel paragrafo 2.9, definite dalla UNI 11040, (*Calcestruzzo Autocompattante, specifiche, caratteristiche e controlli*) mettono in luce i punti essenziali per la formulazione di un calcestruzzo Autocompattante. Le proporzioni fornite dalla norma non sono assolutamente restrittive per cui in molte miscele di SCC uno o più di questi componenti potranno essere presenti in proporzioni al di fuori dei limiti indicati. Non esiste un metodo standard per il progetto delle miscele riguardante il calcestruzzo autocompattante e molte istituzioni accademiche, società che operano nei settori degli additivi, del calcestruzzo preconfezionato, della prefabbricazione e imprese di costruzioni, hanno sviluppato loro stessi i metodi di proporzionamento delle miscele.

I metodi di mix design, spesso, usano il volume come parametro-chiave, in virtù dell'importanza della necessità di riempire i vuoti tra le particelle degli aggregati. Alcuni metodi cercano di adattare i componenti disponibili per ottimizzare la curva granulometrica. Un altro metodo consiste nella valutazione e nell'ottimizzazione della scorrevolezza e della stabilità della pasta prima e della malta poi, prima dell'aggiunta dell'aggregato grosso e prima della prova della miscela finale degli SCC.

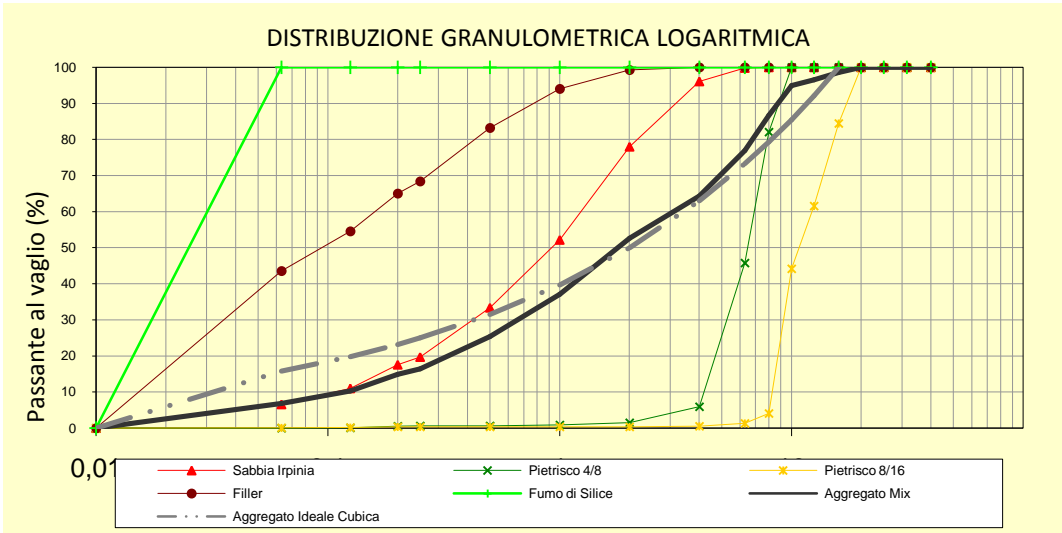
Per ottimizzare la miscela del calcestruzzo autocompattante oggetto della sperimentazione, è stato creato un foglio elettronico in excel, dove facendo variare le % dei costituenti principali: cemento, acqua, finissimi ecc, si rispettano le indicazioni previste dalla normativa.

4.4.1 Mix design SCC

Il mix design risulta identico per tutti e sei le tipologie della sperimentazione, differendo tra loro soltanto nella presenza del fumo di silice e del legante cementizio; di seguito riportiamo un esempio della composizione del mix della tipologia 4): **II-A-LL 32,5 R +S.F.**

Tipologia Mix 4): II-A-LL 32,5 R + S.F.		
Valori Limiti Consentiti UNI 11040	Valori di Progetto	
$160 \text{ L/m}^3 < V_{\text{volume fini}} < 200 \text{ L/m}^3$	192,60228	verificato
$0,85 < V_{\text{acqua}} / V_{\text{fini}} < 1,20$	1,017	verificato
$170 < V_{\text{acqua}} < 210$	195,97	verificato
$V_{\text{inerte grosso}} < 340$	225,64	verificato
$500 \text{ Kg/m}^3 < K_{\text{g finissimi}} < 600 \text{ Kg/m}^3$	574,99074	verificato
$0,31 < a/p_{\text{polveri}} < 0,34$	0,34	verificato
$370 \text{ L/m}^3 < V_{\text{volume pasta}} < 400 \text{ L/m}^3$	397,13	verificato
$48 \% < \% \text{ Inerte sabbie (peso)} < 55 \%$	58	Non verificato
$28 \% < \% V_{\text{volume grosso}} < 35 \%$	35	verificato
$45 \% < \% \text{ Inerte grosso (peso)} < 55 \%$	54,29	verificato

La curva granulometrica ottimale degli inerti si presenta nel seguente modo, utilizzando una **curva ideale Cubica** ($P = 100 * \sqrt[3]{\frac{d}{D_{max}}}$): la quale migliora la fluidità del calcestruzzo, richiedendo una maggiore quantità d’acqua di bagnatura.



Infine le percentuali d’impiego degli inerti sono le seguenti:

Inerti	% d’impiego
Sabbia 0/4	58
Pietrisco 4/8	26
Pietrisco 8/16	9
Filler	3.83
Fumo di silice (11% su cem.)	3.17

Per definire la composizione di calcestruzzo in termini di kg/m^3 di acqua (a), di cemento (c) e di inerte (i) si procede con l’individuare il volume dell’inerte in litri, e quindi:

$$V_i = V_{cls} - V_c - V_a - V_{add.} - V_{a'}, \quad \text{dove:}$$

- $V_{cls} = 1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ Lt.}$;
- $V_c = \frac{\text{cemento (kg)}}{\text{peso specifico } (\frac{\text{kg}}{\text{lt}})}$
- $V_a = \text{volume dell'acqua } a \text{ (lt.)}$
- $V_{add.} = \text{volume degli additivi (lt.)}$; Supefluidificante $\approx 1,3\%$ su cem., VMA $\approx 0,6\%$ su cem;
- $V_{a'} = \text{volume dell'aria } a' \text{ in litri per volume unitario di calcestruzzo, pari a } 2\% \text{ di aria nel calcestruzzo.}$

E quindi ponendo V_{cls} pari a 1 m^3 ed esprimendo tutti i volumi in litri :

$$V_i = 1000 - \left(\frac{c}{3,15} \right) - a - \text{add.} - 2 \% a'$$

$$V_i = 1000 - \left(\frac{414,875}{3,15} \right) - 196,57 - 6,93 - 20 = 644,7 \text{ litri.}$$

Dopodichè moltiplicando il volume dell’inerte V_i per la percentuale d’impiego del singolo inerte otterremo i litri di inerte a m^3 , e se invece moltiplichiamo i litri del singolo inerte per la singola massa volumica in kg/lt. otterremo i Kg/ m^3 di inerte, e cioè:

- $V_i * 58 \% = 373,97 \text{ lt}/m^3 \quad * 2,69 \text{ (Kg/lt)} = 1006,0 \text{ kg}/m^3 \quad \text{di Sabbia 0/4}$
- $V_i * 26 \% = 167,64 \text{ lt}/m^3 \quad * 2,71 \text{ (Kg/lt)} = 454,75 \text{ kg}/m^3 \quad \text{di Pietrischetto 4/8}$
- $V_i * 9 \% = 58,031 \text{ lt}/m^3 \quad * 2,71 \text{ (Kg/lt)} = 157,39 \text{ kg}/m^3 \quad \text{di Pietrisco 8/16}$
- $V_i * 3.83 \% = 24,63 \text{ lt}/m^3 \quad * 2,69 \text{ (Kg/lt)} = 66,25 \text{ kg}/m^3 \quad \text{di Filler}$
- $V_i * 3.17 \% = 20,43 \text{ lt}/m^3 \quad * 2,25 \text{ (Kg/lt)} = 45,98 \text{ kg}/m^3 \quad \text{di Fumo di Silice}$

Il mix design della tipologia 4) **II-A-LL 32,5 R + S.F.** è il seguente:

Inerti	%	Volumi lt/m^3	M.Vol. (kg/lt)	Masse in Kg/m^3
Sabbia 0/4	58	373,97	2,69	1006,0
Pietrischetto 4/8	26	167,64	2,71	454,75
Pietrisco 8/16	9	58,031	2,71	157,39
Filler	3,83	24,63	2,69	66,25
Fumo di Silice	3,17	20,43	2,25	45,98
CEM II-A-LL 32,5	-	131,70	3,15	414,85
Acqua	-	196,67	1,00	196,67
Additivo Superf.	1,324	6,93	1,06	7,34
Additivo VMA	0,6	0	1,06	0
Aria	2,0	20	--	--
a/c (con assorbimento inerti)	0,525	--	--	--
Totale		1000	--	2349,2

Di seguito si riportano i mix con i risultati di prova di lavorabilità, per le sei tipologie d’impasto:

➤ Tipologia 1): **I 52,5 R**

Tip. 1) 52,5 R										Committente TESI		Data e ora 04/08/2014		Prova 1	
-----------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	----------------------------	--	---------------------------------	--	-------------------	--

Inerti	%	Kg/m3	M.Vol.	Volumi	Ass. %	Umidità	H2O	Kg/m3 eff.	-	Impasto (m3)	0.035	Kg prova
Sabbia B.Cave	0	0.000	2.69	0.000	1.685	1.685	0.000	0.000	-	Sabbia B.Cave		0.000
Sabbia 0/4	58	1003.472	2.69	373.038	1.200	0.700	-4.958	998.514	-	Sabbia 0/4		34.948
Pietrisco 4/8	26	453.612	2.713	167.224	0.412	0.412	0.000	453.612	-	Pietrisco 4/8		15.876
Pietrisco 8/16	9	157.002	2.712	57.885	0.107	0.107	0.000	157.002	-	Pietrisco 8/16		5.495
Filler	7	121.109	2.69	45.022	0.000	0.000	0.000	121.109	-	Filler		4.239
Fumo di Silice	0	0.000	2.25	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	Fumo di Silice		0.000
									-			
CEM: I 52,5 R	-	416.755	3.15	132.303	-	-	-	416.755	-	CEM: I 52,5 R		14.586
									-			
Superfluidificante	1.463	6.462	1.06	6.096	-	-	-	6.462	-	Superfluidificante		0.226
Viscosizzante		1.590	1.06	1.500	-	-	-	1.590	-	Viscosizzante		0.056
Acqua di progetto 1	204.5	196.931	1	196.931	-	-	-	201.889	-	Acqua di progetto 1		7.066
Acqua di riciclo	-	0.000	1.06	0.000	-	-	-	0.000	-	Acqua di riciclo		0.000
fini acqua riciclo	-	0.000	0.000	0.000	-	-	-	0.000	-	Acqua totale		7.066
Aria inglobata	2	20.000	1	20.000	-	-	-	20.000	-			
a/c	0.525				-	-	-		-			
M. Volumica teorica	-	2356.933	-	1000.00	-	-	-	2356.933	-			82.493

UNI EN 12350-6

0'30'60'

M. Vol. Fresca e Resa

2386

UNI EN 12350-7

0'30'60'

Aria %

1.4

UNI EN 12350-2 e 11041

0'30'60'

T₅₀₀ (sec.)

6506506401.25

UNI EN 11042

0'5'

V Funnel

6.66.48

UNI EN 11043

0'30'60'

L-Box V. H2/H1

0.98

UNI EN 11044

0'30'60'

U box Δh (mm)

11

UNI EN 11045

0'ΔφΔh_(est-int)

J-Ring (mm)

635153

T °C

26

U.R. %

55

T Cls °C

25

PH

13.1

Cubetti n°

1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-R.

Note

➤ Tipologia 2): I 52,5 R + S.F.

Tip. 2) 52,5 R + SF										Committente TESI		Data e ora 04/08/2014		Prova 2	
Inerti	%	Kg/m3	M.Vol.	Volumi	Ass. %	Umidità	H2O	Kg/m3 eff.	-	Impasto (m3)	0.035	Kg prova			
Sabbia B.Cave	0	0.000	2.69	0.000	1.685	1.685	0.000	0.000	-	Sabbia B.Cave		0.000			
Sabbia 0/4	58	1005.713	2.69	373.871	1.200	0.700	-4.969	1000.744	-	Sabbia 0/4		35.026			
Pietrisco 4/8	26	454.625	2.713	167.597	0.412	0.412	0.000	454.625	-	Pietrisco 4/8		15.912			
Pietrisco 8/16	9	157.353	2.712	58.014	0.107	0.107	0.000	157.353	-	Pietrisco 8/16		5.507			
Filler	3.83	66.412	2.69	24.688	0.000	0.000	0.000	66.412	-	Filler		2.324			
Fumo di Silice	3.17	45.976	2.25	20.434	0.000	0.000	0.000	45.976	-	Fumo di Silice		1.609			
CEM: I 52,5 R	-	415.088	3.15	131.774	-	-	-	415.088	-	CEM: I 52,5 R		14.528			
Superfluidificante	1.747	7.686	1.06	7.251	-	-	-	7.686	-	Superfluidificante		0.269			
Viscosizzante		0.000	1.06	0.000	-	-	-	0.000	-	Viscosizzante		0.000			
Acqua di progetto 1	203.6	196.370	1	196.370	-	-	-	201.339	-	Acqua di progetto 1		7.047			
Acqua di riciclo	-	0.000	1.06	0.000	-	-	-	0.000	-	Acqua di riciclo		0.000			
fini acqua riciclo	-	0.000	0.000	0.000	-	-	-	0.000	-	Acqua totale		7.047			
Aria inglobata	2	20.000	1	20.000	-	-	-	20.000	-						
a/c	0.525				-	-	-		-						
M. Volumica teorica	-	2349.223	-	1000.00	-	-	-	2349.223	-			82.223			

UNI EN 12350-6
M. Vol. Fresca e Resa

0'30'60'

2374

UNI EN 12350-7
Aria %

0'30'60'

2.1

UNI EN 12350-2 e 11041
Slump test o flow (mm)

0'30'60'

T₅₀₀ (sec.)

6406406251.85

UNI EN 11042
V Funnel

0'5'

8.538.65

UNI EN 11043
L-Box V. H2/H1

0'30'60'

0.95

UNI EN 11044
U box Δh (mm)

0'30'60'

15

UNI EN 11045
J-Ring (mm)

0'ΔφΔh_(est-int)

620203

T °C

26

U.R. %

55

T Cls °C

24

PH

12.9

Cubetti n°

1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-R.

Note

➤ Tipologia 3): II-A-LL 32,5 R

Tip. 3) II-A-LL-32,5 R										Committente TESI		Data e ora 05/08/2014		Prova 3	
Inerti	%	Kg/m3	M.Vol.	Volumi	Ass. %	Umidità	H2O	Kg/m3 eff.	-	Impasto (m3)	0.035	Kg prova			
Sabbia B.Cave	0	0.000	2.69	0.000	1.685	1.685	0.000	0.000	-	Sabbia B.Cave		0.000			
Sabbia 0/4	58	1007.047	2.69	374.367	1.200	1.200	0.000	1007.047	-	Sabbia 0/4		35.247			
Pietrisco 4/8	26	455.228	2.713	167.820	0.412	0.412	0.000	455.228	-	Pietrisco 4/8		15.933			
Pietrisco 8/16	9	157.561	2.712	58.091	0.107	0.107	0.000	157.561	-	Pietrisco 8/16		5.515			
Filler	7	121.540	2.69	45.182	0.000	0.000	0.000	121.540	-	Filler		4.254			
Fumo di Silice	0	0.000	2.25	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	Fumo di Silice		0.000			
CEM: II A-LL 32,5 R	-	414.095	3.15	131.459	-	-	-	414.095	-	CEM: II A-LL 32,5 R		14.493			
Superfluidificante	1.324	5.810	1.06	5.481	-	-	-	5.810	-	Superfluidificante		0.203			
Viscosizzante		2.650	1.06	2.500	-	-	-	2.650	-	Viscosizzante		0.093			
Acqua di progetto 1	203.1	195.100	1	195.100	-	-	-	195.100	-	Acqua di progetto 1		6.829			
Acqua di riciclo	-	0.000	1.06	0.000	-	-	-	0.000	-	Acqua di riciclo		0.000			
fini acqua riciclo	-	0.000	0.000	0.000	-	-	-	0.000	-	Acqua totale		6.829			
Aria inglobata	2	20.000	1	20.000	-	-	-	20.000	-						
a/c	0.525				-	-	-		-						
M. Volumica teorica	-	2359.032	-	1000.00	-	-	-	2359.032	-			82.566			

UNI EN 12350-6

0'30'60'

M. Vol. Fresca e Resa

2382

UNI EN 12350-7

0'30'60'

Aria %

1.3

UNI EN 12350-2 e 11041

0'30'60'T₅₀₀ (sec.)

Slump test o flow (mm)

6606606551.15

UNI EN 11042

0'5'

V Funnel

6.476.55

UNI EN 11043

0'30'60'

L-Box V. H2/H1

0.99

UNI EN 11044

0'30'60'

U box Δh (mm)

10

UNI EN 11045

0'ΔφΔh_(est-int)

J-Ring (mm)

650102

T °C

26

U.R. %

55

T Cls °C

24

PH

12.7

Cubetti n°

1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-R.

Note

➤ Tipologia 4): II-A-LL 32,5 R + S.F.

Tip. 4) II-A-LL-32,5 R + SF										Committente TESI		Data e ora 05/08/2014		Prova 4	
Inerti	%	Kg/m3	M.Vol.	Volumi	Ass. %	Umidità	H2O	Kg/m3 eff.	-	Impasto (m3)	0.035	Kg prova			
Sabbia B.Cave	0	0.000	2.69	0.000	1.685	1.685	0.000	0.000	-	Sabbia B.Cave		0.000			
Sabbia 0/4	58	1006.000	2.69	373.978	1.200	0.980	-2.187	1003.813	-	Sabbia 0/4		35.133			
Pietrisco 4/8	26	454.754	2.713	167.645	0.412	0.412	0.000	454.754	-	Pietrisco 4/8		15.916			
Pietrisco 8/16	9	157.397	2.712	58.031	0.107	0.107	0.000	157.397	-	Pietrisco 8/16		5.509			
Filler	3.82	66.257	2.69	24.631	0.000	0.000	0.000	66.257	-	Filler		2.319			
Fumo di Silice	3.17	45.990	2.25	20.440	0.000	0.000	0.000	45.990	-	Fumo di Silice		1.610			
CEM: II A-LL 32,5 R	-	414.875	3.15	131.706	-	-	-	414.875	-	CEM: II A-LL 32,5 R		14.521			
Superfluidificante	1.671	7.347	1.06	6.931	-	-	-	7.347	-	Superfluidificante		0.257			
Viscosizzante		0.000	1.06	0.000	-	-	-	0.000	-	Viscosizzante		0.000			
Acqua di progetto 1	203.5	196.574	1	196.574	-	-	-	198.761	-	Acqua di progetto 1		6.957			
Acqua di riciclo	-	0.000	1.06	0.000	-	-	-	0.000	-	Acqua di riciclo		0.000			
fini acqua riciclo	-	0.000	0.000	0.000	-	-	-	0.000	-	Acqua totale		6.957			
Aria inglobata	2	20.000	1	20.000	-	-	-	20.000	-						
a/c	0.525				-	-	-		-						
M. Volumica teorica	-	2349.194	-	1000	-	-	-	2349.194	-			82.222			

UNI EN 12350-6	0'	30'	60'
M. Vol. Fresca e Resa	2370		

UNI EN 12350-7	0'	30'	60'
Aria %	1.9		

UNI EN 12350-2 e 11041	0'	30'	60'	T ₅₀₀ (sec.)
Slump test o flow (mm)	645	645	630	1.6

UNI EN 11042	0'	5'
V Funnel	8.1	8.15

UNI EN 11043	0'	30'	60'
L-Box V. H2/H1	0.96		

UNI EN 11044	0'	30'	60'
U box Δh (mm)	12		

UNI EN 11045	0'	Δφ	Δh _(est-int)
J-Ring (mm)	630	15	3

T °C	26	U.R. %	55
T Cls °C	23	PH	12.6

Cubetti n°	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-R.
------------	-------------------------------

Note	
------	--

➤ Tipologia 5): II-A-LL 42,5 R + S.F.

Tipo 5) II-A-LL- 42,5 R										Committente TESI		Data e ora 07/02/2015		Prova 5	
Inerti	%	Kg/m3	M.Vol.	Volumi	Ass. %	Umidità	H2O	Kg/m3 eff.	-	Impasto (m3)	0,035	Kg prova			
Sabbia B.Cave	0	0,000	2,69	0,000	1,685	1,685	0,000	0,000	-	Sabbia B.Cave		0,000			
Sabbia Irpinia	58	1004,640	2,69	373,472	1,200	0,800	-3,971	1000,669	-	Sabbia Irpinia		35,023			
Pietrischetto	26	454,139	2,713	167,418	0,412	0,412	0,000	454,139	-	Pietrischetto		15,895			
Pietrisco	9	157,185	2,712	57,953	0,107	0,107	0,000	157,185	-	Pietrisco		5,501			
Filler	7	121,250	2,69	45,074	0,000	0,000	0,000	121,250	-	Filler		4,244			
Fumo di Silice	0	0,000	2,25	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	Fumo di Silice		0,000			
CEM: II A-LL 42,5 R	-	415,886	3,15	132,027	-	-	-	415,886	-	CEM: II A-LL 42,5 R		14,556			
Superfluidificante	1,372	6,048	1,06	5,705	-	-	-	6,048	-	Superfluidificante		0,212			
Viscosizzante		1,590	1,06	1,500	-	-	-	1,590	-	Viscosizzante		0,056			
Acqua di progetto 1	204,1	196,850	1	196,850	-	-	-	200,821	-	Acqua di progetto 1		7,029			
Acqua di riciclo	-	0,000	1,06	0,000	-	-	-	0,000	-	Acqua di riciclo		0,000			
fini acqua riciclo	-	0,000	#####	0,000	-	-	-	0,000	-	Acqua totale		7,029			
Aria inglobata	2	20,000	1	20,000	-	-	-	20,000	-						
a/c	0,525				-	-	-		-						
M. Volumica teorica	-	2357,587	-	1000,00	-	-	-	2357,587	-			82,516			

UNI EN 12350-6	0'	30'	60'	
M. Vol. Fresca e Resa	2364			
UNI EN 12350-7	0'	30'	60'	
Aria %	1,3			
UNI EN 12350-2 e 11041	0'	30'	60'	T ₅₀₀ (sec.)
Slump test o flow (mm)	655	655	650	1,2
UNI EN 11042	0'	5'		
V Funnel	6,53	6,51		
UNI EN 11043	0'	30'	60'	
L-Box V. H2/H1	0,97			
UNI EN 11044	0'	30'	60'	
U Box Δh (mm)	10			
UNI EN 11045	0'	Δφ	Δh (est-int)	
J-Ring (mm)	645	12	3	
T °C	10	U.R. %	70	
T Cls °C	8	PH	12,9	
Cubetti n°	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-R			
Note				

➤ Tipologia 6): II-A-LL 42,5 R + S.F.

Tipo 6) II-A-LL 42,5 R + SF										Committente TESI		Data e ora 07/02/2015		Prova 6	
Inerti	%	Kg/m3	M.Vol.	Volumi	Ass. %	Umidità	H2O	Kg/m3 eff.	-	Impasto (m3)	0,036	Kg prova			
Sabbia B.Cave	0	0,000	2,69	0,000	1,685	1,685	0,000	0,000	-	Sabbia B.Cave		0,000			
Sabbia Irpinia	58	1001,181	2,69	372,186	1,200	0,800	-3,957	997,224	-	Sabbia Irpinia		34,903			
Pietrischetto	25,5	443,873	2,713	163,634	0,412	0,412	0,000	443,873	-	Pietrischetto		15,536			
Pietrisco	9	156,844	2,712	57,753	0,107	0,107	0,000	156,844	-	Pietrisco		5,483			
Filler	4,3	74,225	2,69	27,593	0,000	0,000	0,000	74,225	-	Filler		2,598			
Fumo di Silice	3,17	45,769	2,25	20,342	0,000	0,000	0,000	45,769	-	Fumo di Silice		1,602			
CEM: II A-LL 42,5 R	-	418,416	3,15	132,830	-	-	-	418,416	-	CEM: II A-LL 42,5 R		14,645			
Superfluidificante	1,657	7,351	1,06	6,935	-	-	-	7,351	-	Superfluidificante		0,257			
Viscosizzante	0,000	0,000	1,06	0,000	-	-	-	0,000	-	Viscosizzante		0,000			
Acqua di progetto 1	205,5	198,534	1	198,534	-	-	-	202,492	-	Acqua di progetto 1		7,087			
Acqua di riciclo	-	0,000	1,06	0,000	-	-	-	0,000	-	Acqua di riciclo		0,000			
fini acqua riciclo	-	0,000	#####	0,000	-	-	-	0,000	-	Acqua totale		7,087			
Aria inglobata	2	20,000	1	20,000	-	-	-	20,000	-						
a/c	0,525				-	-	-		-						
M. Volumica teorica	-	2345,993	-	999,81	-	-	-	2345,993	-			82,110			
<div> <div>UNI EN 12350-6</div> <div>0' 30' 60'</div> <div>M. Vol. Fresca e Resa</div> <div>2372</div> </div> <div> <div>UNI EN 12350-7</div> <div>0' 30' 60'</div> <div>Aria %</div> <div>2</div> </div> <div> <div>UNI EN 12350-2 e 11041</div> <div>0' 30' 60' T500(sec.)</div> <div>Slump test o flow (mm)</div> <div>642 642 630 1,75</div> </div> <div> <div>UNI EN 11042</div> <div>0' 5'</div> <div>V Funnel</div> <div>8,31 8,45</div> </div> <div> <div>UNI EN 11043</div> <div>0' 30' 60'</div> <div>L-Box V. H2/H1</div> <div>0,95</div> </div>															
<div> <div>UNI EN 11044</div> <div>0' 30' 60'</div> <div>U Box Δh (mm)</div> <div>13</div> </div> <div> <div>UNI EN 11045</div> <div>0' Δδ Δh (est-int)</div> <div>J-Ring (mm)</div> <div>630 17 3</div> </div> <div> <div>T °C</div> <div>10</div> <div>U.R. %</div> <div>70</div> </div> <div> <div>T Cls °C</div> <div>8</div> <div>PH</div> <div>12,7</div> </div> <div> <div>Cubetti n°</div> <div>1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-R</div> </div> <div> <div>Note</div> <div></div> </div>															

4.4.2 Verifica Contenuto di cloruri

Per un calcestruzzo durevole, progettato in qualsiasi classe di esposizione (X0, XC, XD, XS, XF, XA), la norma UNI 11040, in accordo alla UNI-EN 206-1 , prevede il calcolo del **contenuto dei cloruri** che vengono immessi dai vari costituenti del calcestruzzo (inerti, cemento, acqua, additivo, aggiunte); il valore in % o mg/l di cloruri Cl⁻ dichiarato dal produttore si ricava dalla marcatura CE di ciascun costituente; dunque per la determinazione del contenuto in cloruri del calcestruzzo, si deve calcolare la somma dei contributi apportati dai vari materiali componenti, utilizzando il metodo del calcolo basato sul contenuto massimo di cloruri permesso dalla norma relativa al componente, oppure dichiarato dal produttore per ciascun materiale componente. La percentuale di cloruro viene prescelta nel *prospetto 10* della UNI 11040 in base all’impiego del calcestruzzo. Individuati i grammi di cloruri (da legge o dichiarato), si calcola la percentuale di ioni cloruro rispetto alla massa del cemento, percentuale che non deve superare il valore per la classe prescelta nel *prospetto 10* della UNI 11040:

prospetto 10

Contenuto massimo di cloruri nel calcestruzzo		
Impiego del calcestruzzo	Classe di contenuto in cloruri ^{a)}	Massimo contenuto di Cl ⁻ rispetto alla massa del cemento ^{b)}
In assenza di armatura di acciaio o di altri inserti metallici (ad eccezione dei dispositivi di sollevamento resistenti alla corrosione)	Cl 1,0	1,0%
In presenza di armatura d'acciaio o di altri inserti metallici	Cl 0,20	0,20%
	Cl 0,40	0,40%
In presenza di armatura d'acciaio da precompressione	Cl 0,10	0,10%
	Cl 0,20	0,20%
a) La classe da applicare per uno specifico utilizzo del calcestruzzo dipende da disposizioni valide nel luogo d'impiego del calcestruzzo.		
b) Qualora siano impiegate aggiunte di tipo II e siano considerate nel computo del dosaggio di cemento, il contenuto in cloruri viene espresso come percentuale di ioni cloruro in massa rispetto al cemento + la massa totale delle aggiunte considerate.		

Come si evince dal prospetto 10 al punto b): “Qualora siano impiegate aggiunte tipo II, il contenuto in cloruri viene espresso come percentuale di ioni cloruro in massa rispetto al

cemento + la massa totale delle aggiunte considerate”; quindi inserendo nel calcestruzzo aggiunte tipo II la percentuale di cloruri diminuisce all’aumentare della quantità di aggiunta immessa nel calcestruzzo; nel nostro caso con la presenza del fumo di silice all’11% sul cemento avremo una riduzione della percentuale del contenuto di cloruri. Nelle pagine seguenti si riporta il calcolo del contenuto massimo di cloruri nel calcestruzzo per le varie tipologie di mix.

Tipologia 1): I 52,5 R

Determinazione contenuto di cloruri nel calcestruzzo: TIP. 1) 52,5 R							
Componenti	Dosaggio a 1 m ³	U.M.	CL ⁻ da legge	CL ⁻ dichiarato	-	grammi CL ⁻ da legge	grammi CL ⁻ dichiarato
Sabbia B.Cave	0.000	Kg/m ³	0.01	0.01	%	0.00	0.00
Sabbia 0/4	1003.472	Kg/m ³	0.01	0.01	%	100.35	100.35
Pietrisco 4/8	453.612	Kg/m ³	0.01	0.01	%	45.36	45.36
Pietrisco 8/16	157.002	Kg/m ³	0.01	0.01	%	15.70	15.70
Filler	121.1087077	Kg/m ³	0.01	0.01	%	12.11	12.11
Fumo di Silice	0	Kg/m ³	0.01	0.01	%	0.00	0.00
CEM: I 52,5 R	416.755	Kg/m ³	0.1	0.05	%	416.76	208.38
Acqua di progetto 1	196.931	l/m ³	108	108	mg/l	21.269	21.269
Acqua di riciclo	0	l/m ³	96	96	mg/l	0.000	0.000
Superfluidificante	6.096	l/m ³	0.1	0.1	%	6.096	6.096
Viscosizzante	1.5	l/m ³	0.1	0.1	%	15	15
Totale g di cloruro m ³						632.64	424.26
Contenuto totale % cloruri rispetto al cemento						% 0.152	% 0.102
Massimo contenuto ammissibile :						0.2	0.2
La percentuale di cloruro ammissibile varia fra il 0,2 < x % <0,4, come prescritto nel prospetto 10 della UNI 11040							
Il contenuto relativo al cemento è preso cautelativamente pari al massimo di legge.							
Il contenuto relativo al cemento è preso pari al valore tipico dichiarato.							

➤ Tipologia 2): I 52,5 R + S.F.

Determinazione contenuto di cloruri nel calcestruzzo: TIP. 2) 52,5 R +S.F.							
Componenti	Dosaggio a 1 m ³	U.M.	CL ⁻ <i>da legge</i>	CL ⁻ <i>dichiarato</i>	-	grammi CL ⁻ <i>da legge</i>	grammi CL ⁻ <i>dichiarato</i>
Sabbia B.Cave	0.000	Kg/m ³	0.01	0.01	%	0.00	0.00
Sabbia 0/4	1005.713	Kg/m ³	0.01	0.01	%	100.57	100.57
Pietrisco 4/8	454.625	Kg/m ³	0.01	0.01	%	45.46	45.46
Pietrisco 8/16	157.353	Kg/m ³	0.01	0.01	%	15.74	15.74
Filler	66.41176635	Kg/m ³	0.01	0.01	%	6.64	6.64
Fumo di Silice	45.97648417	Kg/m ³	0.01	0.01	%	4.60	4.60
CEM: I 52,5 R	415.088	Kg/m ³	0.1	0.05	%	415.09	207.54
Acqua di progetto 1	196.370	l/m ³	108	108	mg/l	21.208	21.208
Acqua di riciclo	0	l/m ³	96	96	mg/l	0.000	0.000
Superfluidificante	7.251	l/m ³	0.1	0.1	%	7.251	7.251
Viscosizzante	0	l/m ³	0.1	0.1	%	0	0
Totale g di cloruro m ³						616.55	409.01
						%	%
Contenuto totale % cloruri rispetto al cemento						0.134	0.089
Massimo contenuto ammissibile :						0.2	0.2
La percentuale di cloruro ammissibile varia fra il 0,2 < x % <0,4, come prescritto nel prospetto 10 della UNI11040							
Il contenuto relativo al cemento è preso cautelativamente pari al massimo di legge.							
Il contenuto relativo al cemento è preso pari al valore tipico dichiarato.							

➤ Tipologia 3): II-A-LL 32,5 R

Determinazione contenuto di cloruri nel calcestruzzo: TIP. 3) II-A-LL-32,5 R							
Componenti	Dosaggio a 1 m ³	U.M.	CL ⁻	CL ⁻	-	grammi CL ⁻	grammi CL ⁻
			da legge	dichiarato		da legge	dichiarato
Sabbia B.Cave	0.000	Kg/m ³	0.01	0.01	%	0.00	0.00
Sabbia 0/4	1007.047	Kg/m ³	0.01	0.01	%	100.70	100.70
Pietrisco 4/8	455.228	Kg/m ³	0.01	0.01	%	45.52	45.52
Pietrisco 8/16	157.561	Kg/m ³	0.01	0.01	%	15.76	15.76
Filler	121.5402126	Kg/m ³	0.01	0.01	%	12.15	12.15
Fumo di Silice	0	Kg/m ³	0.01	0.01	%	0.00	0.00
CEM: II A-LL 32,5 R	414.095	Kg/m ³	0.1	0.06	%	414.10	248.46
Acqua di progetto 1	195.100	l/m ³	108	108	mg/l	21.071	21.071
Acqua di riciclo	0	l/m ³	96	96	mg/l	0.000	0.000
Superfluidificante	5.481	l/m ³	0.1	0.1	%	5.481	5.481
Viscosizzante	2.5	l/m ³	0.1	0.1	%	25	25
Totale g di cloruro m ³						639.78	474.15
						%	%
Contenuto totale % cloruri rispetto al cemento						0.155	0.115
Massimo contenuto ammissibile :						0.2	0.2
La percentuale di cloruro ammissibile varia fra il 0,2 < x % < 0,4, come prescritto nel prospetto 10 della UNI 11040							
Il contenuto relativo al cemento è preso cautelativamente pari al massimo di legge.							
Il contenuto relativo al cemento è preso pari al valore tipico dichiarato.							

➤ Tipologia 4): II-A-LL 32,5 R + S.F.

Determinazione contenuto di cloruri nel calcestruzzo: TIP. 4) II-A-LL 32,5 R + S.F.							
Componenti	Dosaggio a 1 m ³	U.M.	CL ⁻ <i>da legge</i>	CL ⁻ <i>dichiarato</i>	-	grammi CL ⁻ <i>da legge</i>	grammi CL ⁻ <i>dichiarato</i>
Sabbia B.Cave	0.000	Kg/m ³	0.01	0.01	%	0.00	0.00
Sabbia 0/4	1006.000	Kg/m ³	0.01	0.01	%	100.60	100.60
Pietrisco 4/8	454.754	Kg/m ³	0.01	0.01	%	45.48	45.48
Pietrisco 8/16	157.397	Kg/m ³	0.01	0.01	%	15.74	15.74
Filler	66.25721864	Kg/m ³	0.01	0.01	%	6.63	6.63
Fumo di Silice	45.98956888	Kg/m ³	0.01	0.01	%	4.60	4.60
CEM: II A-LL 32,5 R	414.875	Kg/m ³	0.1	0.06	%	414.87	248.92
Acqua di progetto 1	196.574	l/m ³	108	108	mg/l	21.230	21.230
Acqua di riciclo	0	l/m ³	96	96	mg/l	0.000	0.000
Superfluidificante	6.931	l/m ³	0.1	0.1	%	6.931	6.931
Viscosizzante	0	l/m ³	0.1	0.1	%	0	0
Totale g di cloruro m ³						616.08	450.13
						%	%
Contenuto totale % cloruri rispetto al cemento						0.134	0.098
Massimo contenuto ammissibile :						0.2	0.2
La percentuale di cloruro ammissibile varia fra il 0,2 < x % <0,4, come prescritto nel prospetto 10 della UNI 11040							
Il contenuto relativo al cemento è preso cautelativamente pari al massimo di legge.							
Il contenuto relativo al cemento è preso pari al valore tipico dichiarato.							

➤ Tipologia 5): II-A-LL 42,5 R

Determinazione contenuto di cloruri nel calcestruzzo: Tipo 5) II-A-LL- 42,5 R							
Componenti	Dosaggio a 1 m ³	U.M.	CL ⁻ <i>da legge</i>	CL ⁻ <i>dichiarato</i>	-	grammi CL ⁻ <i>da legge</i>	grammi CL ⁻ <i>dichiarato</i>
Sabbia B.Cave	0,000	Kg/m ³	0,01	0,01	%	0,00	0,00
Sabbia Irpinia	1004,640	Kg/m ³	0,01	0,01	%	100,46	100,46
Pietrischetto	454,139	Kg/m ³	0,01	0,01	%	45,41	45,41
Pietrisco	157,185	Kg/m ³	0,01	0,01	%	15,72	15,72
Filler	121,2496178	Kg/m ³	0,01	0,01	%	12,12	12,12
Fumo di Silice	0	Kg/m ³	0,01	0,01	%	0,00	0,00
CEM: II A-LL 42,5 R	415,886	Kg/m ³	0,1	0,04	%	415,89	166,35
Acqua di progetto 1	196,850	l/m ³	108	108	mg/l	21,260	21,260
Acqua di riciclo	0	l/m ³	96	96	mg/l	0,000	0,000
Superfluidificante	5,705	l/m ³	0,1	0,1	%	5,705	5,705
Viscosizzante	1,5	l/m ³	0,1	0,1	%	15	15
Totale g di cloruro m ³						631,57	382,04
						%	%
Contenuto totale % cloruri rispetto al cemento						0,152	0,092
Massimo contenuto ammissibile :						0,2	0,2
La percentuale di cloruro ammissibile varia fra il 0,2 < x % < 0,4, come prescritto nel prospetto 10 della Uni En 206-1:2006							
Il contenuto relativo al cemento è preso cautelativamente pari al massimo di legge.							
Il contenuto relativo al cemento è preso pari al valore tipico dichiarato.							

➤ Tipologia 6): II-A-LL 42,5 R + S.F.

Determinazione contenuto di cloruri nel calcestruzzo: Tipo 6) II-A-LL- 42,5 R + SF							
Componenti	Dosaggio a 1 m ³	U.M.	CL ⁻ <i>da legge</i>	CL ⁻ <i>dichiarato</i>	-	grammi CL ⁻ <i>da legge</i>	grammi CL ⁻ <i>dichiarato</i>
Sabbia B.Cave	0,000	Kg/m ³	0,01	0,01	%	0,00	0,00
Sabbia Irpinia	1001,181	Kg/m ³	0,01	0,01	%	100,12	100,12
Pietrischetto	443,873	Kg/m ³	0,01	0,01	%	44,39	44,39
Pietrisco	156,644	Kg/m ³	0,01	0,01	%	15,66	15,66
Filler	74,22549008	Kg/m ³	0,01	0,01	%	7,42	7,42
Fumo di Silice	45,769284	Kg/m ³	0,01	0,01	%	4,58	4,58
CEM: II A-LL 42,5 R	418,416	Kg/m ³	0,1	0,04	%	418,42	167,37
Acqua di progetto 1	198,534	l/m ³	108	108	mg/l	21,442	21,442
Acqua di riciclo	0	l/m ³	96	96	mg/l	0,000	0,000
Superfluidificante	6,935	l/m ³	0,1	0,1	%	6,935	6,935
Viscosizzante	0	l/m ³	0,1	0,1	%	0	0
Totale g di cloruro m ³						618,96	367,91
						%	%
Contenuto totale % cloruri rispetto al cemento						0,148	0,088
Massimo contenuto ammissibile :						0,2	0,2
La percentuale di cloruro ammissibile varia fra il 0,2 < x % < 0,4, come prescritto nel prospetto 10 della Uni En 206-1:2006							
Il contenuto relativo al cemento è preso cautelativamente pari al massimo di legge.							
Il contenuto relativo al cemento è preso pari al valore tipico dichiarato.							

4.5 Test su calcestruzzo autocompattante SCC allo stato fresco e confezionamenti cubetti

Il confezionamento ed i relativi test dell'autocompattante allo stato fresco per ogni tipologia di mix, sono stati effettuati nella centrale di betonaggio della “C.M.C. s.r.l.”, seguendo tutte le indicazioni di normativa della medesima prova.

Slump-flow secondo la UNI 12350-8



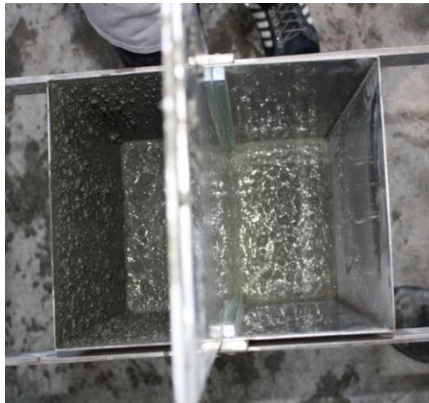
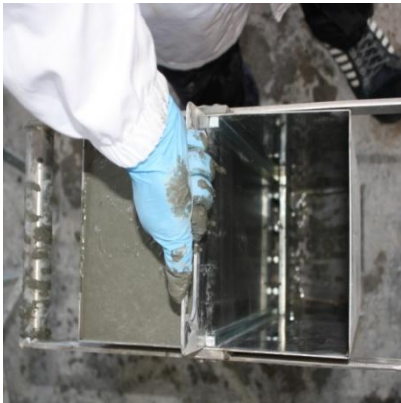
V-Funnel secondo la UNI 12350-9



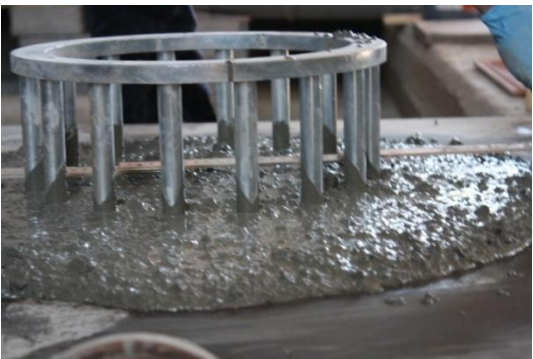
L Box secondo la UNI 12350-10



U Box secondo la UNI 11044



J-Ring secondo la UNI 12350-12



Test % aria inglobata e Massa Volumica con Porosimetro secondo la UNI EN 12350-7, UNI 12350-6



Misura Temperatura T °C e pH calcestruzzo mediante datalogger



Confezionamento e stagionatura provini secondo la UNI EN 12350-1

Dopo aver effettuato i test sulle proprietà reologiche dell'autocompattante, si passa al confezionamento dei 12 cubetti più la riserva, in cubiere di acciaio 150_{mm}³:



I seguenti provini verranno, sfornati dalle cubiere dopo 16 h dal confezionamento, siglati secondo le indicazioni della sperimentazione, ed immersi in vasca contenente acqua a temperatura $\pm 20^\circ$ e U.R. 100% per la stagionatura:



I provini rimarranno in vasca fino al conseguimento del 28^{gg} di maturazione, ma per ragioni tecniche il giorno antecedente, tali cubetti verranno sollevati dalla vasca, in modo che per il giorno seguente siano perfettamente asciutti per essere sottoposti ai test di laboratorio allo stato indurito:



4.6 Test su calcestruzzo autocompattante SCC allo stato indurito

I test sui provini di calcestruzzo allo stato indurito sono stati effettuati nel Laboratorio Ufficiale della “Tecnolab s.r.l.”, seguendo tutte le indicazioni di normativa della medesima prova.

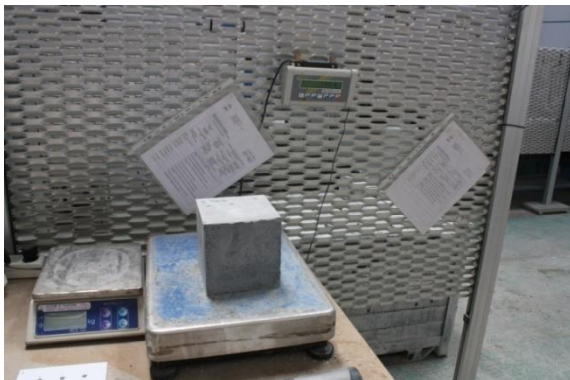
4.6.1 Prova Monoassiale a Compressione (*Distruttiva*)

Per effettuare il test a compressione ed individuare il valore di rottura, risulta necessario eseguire delle operazioni stabilite dalla normativa:

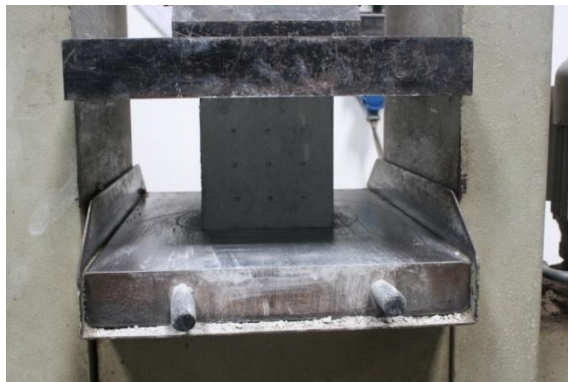
- Per ogni cubetto, verificata la *planarità* e la *perpendicolarità* (**UNI-EN 12390-1**), si passa alla misura del volume in litri effettivi del cubetto mediante il calibro di precisione;



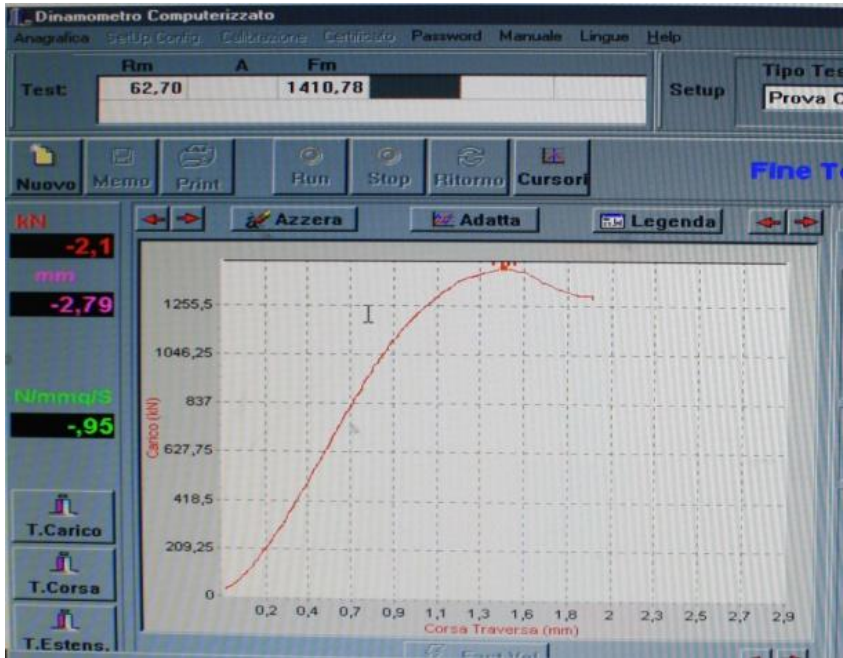
- Calcolo dell'area in mm^2 del cubetto su cui il piatto della pressa esercita la forza (ortogonale all'area di getto);
- Calcolo Massa Volumica allo stato indurito (**UNI-EN 12390-7**), che si ottiene dividendo il peso per i litri effettivi del cubetto;



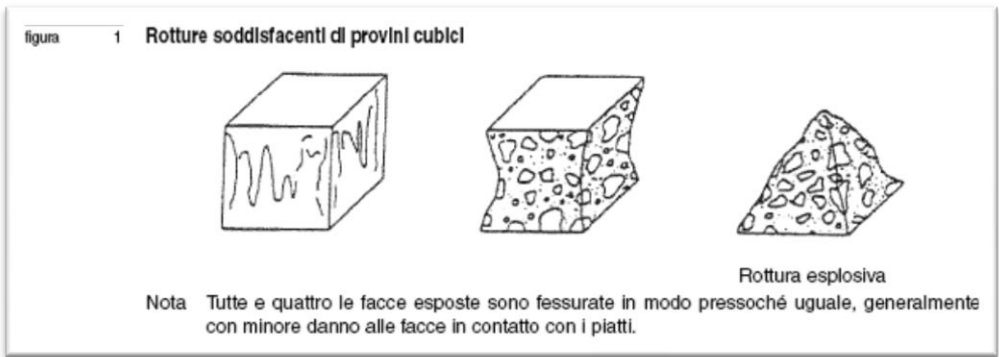
- Posizionamento cubetto sotto la pressa, in modo che il carico sia applicato perpendicolarmente alla direzione del getto (**UNI-EN 12390-3**), la velocità di carico a compressione impostata alla macchina è di $0,5 \text{ N/mm}^2 \text{ sec}$.



- Azionata la pressa, e compilati i dati del cubetto (area di prova, litri , peso, ecc) al programma “Dinanometro Computerizzato”, esso ci fornirà: Il *diagramma forza/spostamento*, *Forza massima di Rottura (Fm)*, *Tensione massima a Compressione* $R_m = \frac{F_{max}}{Area} = \text{Mpa}$;



Dalle foto sotto riportate, si desume come la rottura del cubetto soddisfi il requisito di Rottura soddisfacente (*piramidale*) della UNI-EN 12390-3:



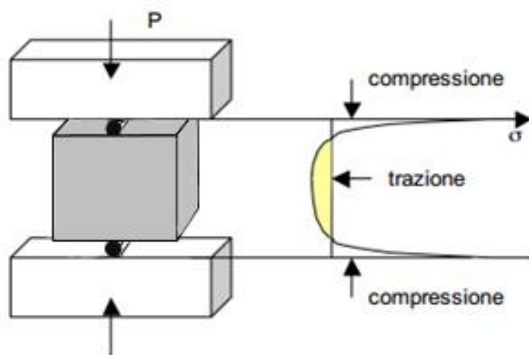
4.6.2 Prova di Trazione Indiretta “Brasiliiana” (Distruttiva)

Lo scopo della prova è determinare il valore della resistenza a trazione su provini cubici di calcestruzzo, seguendo le indicazioni della **UNI-EN 12390-6**. Per effettuare il test a trazione indiretta ed individuare il valore di rottura, risulta necessario eseguire delle operazioni stabilite dalla normativa:

- Per ogni cubetto, verificata la *planarità* e la *perpendicolarità* (**UNI-EN 12390-1**), si passa alla misura del volume in litri effettivi del cubetto mediante il calibro di precisione;
- Calcolo della sezione di rottura in (ortogonale all’area di getto);
- Calcolo Massa Volumica allo stato indurito (**UNI-EN 12390-7**), che si ottiene dividendo il peso per i litri effettivi del cubetto;
- Tracciare due linee in posizione opposta l’una dall’altra, lungo le quali applicare il carico di compressione;



Azionata la pressa, si sottopone il provino ad una forza di compressione ad una velocità di 50 N/cm^2 secondo le mezzerie di due facce parallele tramite due barre in acciaio. Sulla sezione verticale del provino si generano tensioni di compressione vicino alle piastre di appoggio, e di trazione nella zona centrale a causa del conseguente rigonfiamento, generato dallo stato tensionale di trazione su gran parte della sezione di rottura normale all’applicazione del carico.



- Azionata la pressa, e compilati i dati del cubetto (area di prova, litri , peso, ecc) al programma “Dinamometro Computerizzato”, esso ci fornirà: Il *diagramma forza/spostamento*, *Forza massima di Rottura (F_m)*;
- Per l’attendibilità della prova la rottura deve avvenire secondo una superficie approssimativamente piana contenente le due linee di carico (come in figura seguente).



La resistenza a trazione indiretta è data dalla formula:

$$f_{ct} = \frac{2 * F}{\pi * A}$$

dove:

f_{ct} = è la resistenza alla trazione indiretta, in Megapascal o Newton per millimetro quadrato;

F = è il carico massimo di rottura del provino (N);

A = sezione di rottura (mm^2);

4.6.3 Prove sclerometriche ed ultrasoniche”Metodo SON-REB” (Non Distruttiva)

Per avere conferma sui valori di resistenza a compressione ricavati dalle prove di compressione sono state eseguite anche prove non distruttive. In particolare si ci è avvalsi del metodo SON-REB, il quale abbina alla misura della velocità di propagazione degli ultrasuoni, la misura dell'indice di rimbalzo sclerometrico. Attraverso la coniugazione delle due prove si migliora l'affidabilità dei risultati: tale metodo consente infatti di superare gli errori che si ottengono utilizzando separatamente il metodo sclerometrico, che è un metodo di indagine superficiale, e il metodo ultrasonico, che invece è un metodo di indagine influenzato dalla morfologia del materiale all'interno del provino.

Il metodo SON-REB è caratterizzato dall'abbinamento di prove sclerometriche ed ultrasoniche, pertanto si rimandano alle indicazioni normative per ognuna di esse:

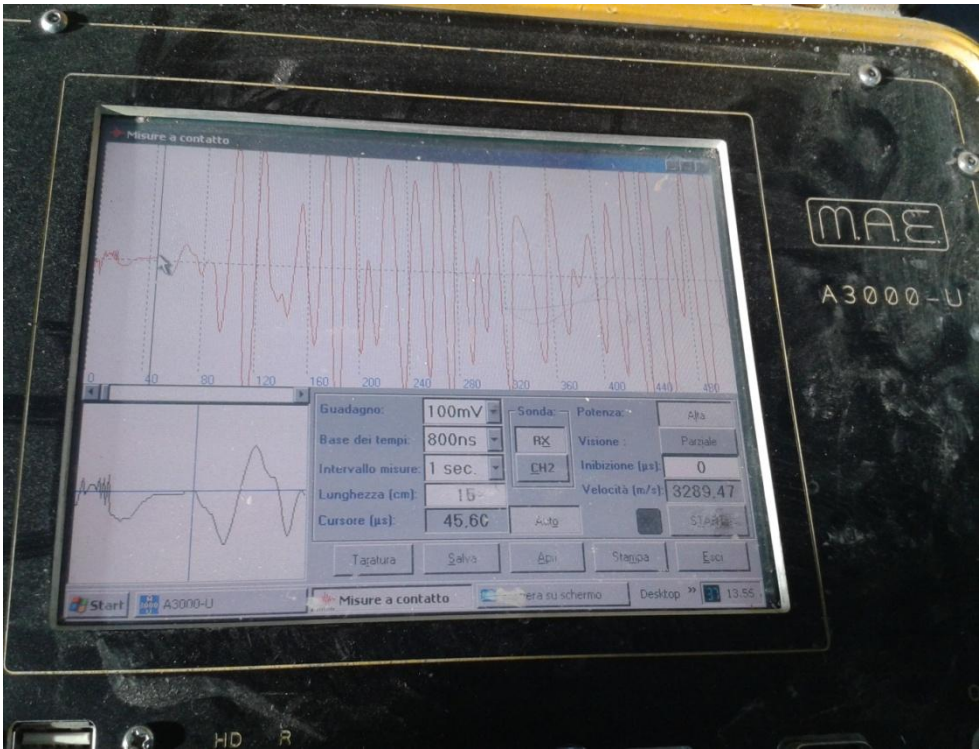
- per le prove sclerometriche si è fatto riferimento alla **UNI EN 12504 – 2**;
- per le prove ultrasoniche si è fatto riferimento alla **UNI EN 12504 – 4**;

4.6.3.1 Prova Ultrasonica

Con riferimento al metodo di prova normalizzato, ai sensi della **UNI EN 12504 – 4**, sono state applicate su due facce opposte del cubetto le due sonde da 53 Hz (*misura diretta: trasmettitore e ricevitore in direzioni opposte con in mezzo l'elemento da indagare*) avendo cura che l'adesione di queste ultime alle superfici dell'elemento fosse accurata al fine di escludere l'inclusione di aria che avrebbe provocato un'attenuazione del segnale; a tal fine si è utilizzato un prodotto sotto forma di gel.



Successivamente si è proceduto con la misura del tempo di propagazione delle onde tramite oscilloscopio (così come mostrato in figura).

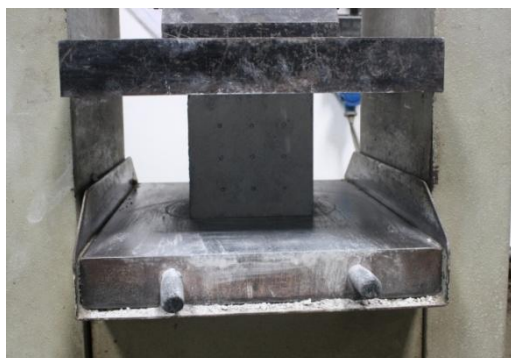


4.6.3.2 Prova Sclerometrica

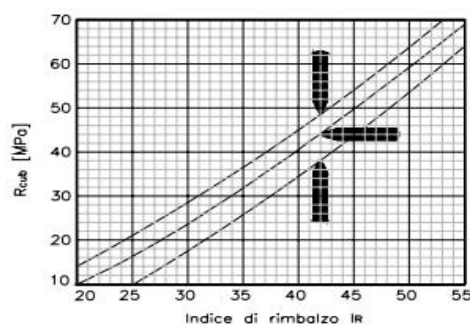
Scopo della prova è la determinazione dell'indice sclerometrico (o di rimbalzo IR) in una zona di calcestruzzo indurito, confezionato con aggregati ordinari.

Con riferimento al metodo di prova normalizzato, ai sensi della **UNI EN 12504 – 2**, sui provini oggetto della sperimentazione sono stati dapprima individuati i 9 punti di battuta da sottoporre a test, distanziati di $37,5\text{ mm}$ fra loro e dal bordo esterno.

Successivamente ciascun provino è stato posto al di sotto della macchina per le prove di schiacciamento ed è stato caricato con una forza di 30 kN in maniera tale da impedire il movimento dello stesso durante le battute sclerometriche.



La prova consiste nel posizionare lo strumento ortogonalmente sulla superficie del punto di battuta, ed aumentare la pressione sullo sclerometro fino a produrre l'urto. L'indice di rimbalzo va trasformato in Resistenza cubica attraverso le curve di correlazione legate alla direzione d'uso dello sclerometro.

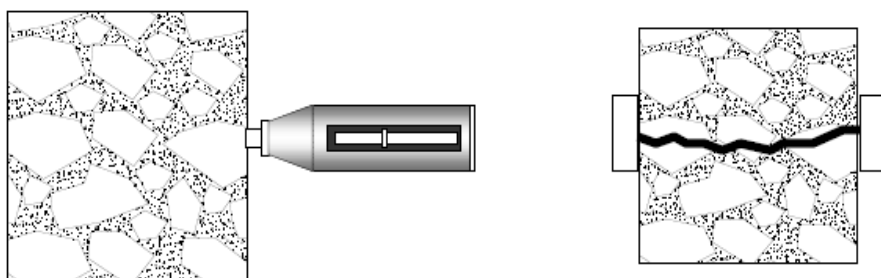


Metodo SON-REB

Lo scopo della prova è la determinazione della resistenza a compressione del calcestruzzo indurito. Per ridurre gli errori commessi con le due metodologie sopra descritte è stato sviluppato il metodo combinato SONREB (SONic + REBound = ultrasuoni+sclerometro).

L'idea di combinare i risultati di queste due prove nasce dal fatto che:

1. *l'indice sclerometrico è fortemente influenzato dallo strato superficiale;*
2. *la velocità di propagazione dell'ultrasuono è regolata dalla morfologia del materiale al suo interno;*



Una volta effettuate per tutti i provini oggetto della sperimentazione le due prove, ultrasoniche e sclerometriche, si procede con la combinazione dei dati da esse forniti, ossia da un lato la velocità di propagazione dell'impulso sonico e dall'altro l'indice di rimbalzo.

In termini teorici sia il rimbalzo di una massa battente (sclerometrica) che la propagazione di un impulso all'interno del materiale (ultrasonica) sono funzione dell'energia di dissipazione. La resistenza del materiale è per natura funzione della stessa energia di dissipazione, pertanto correlando le due formulazioni è possibile ricavarne le relazioni che seguono.

Formula di calcolo

$$R_{cls} = \alpha \cdot \delta \cdot R_s^{\beta} \cdot v^{\gamma}$$

$$\begin{aligned} R_{cls1} &= \alpha_1 \cdot 7,695 \cdot 10^{(-10)} \cdot R_s^{1,450} \cdot (v1)^{2,58} && \text{(RILEM1993, NDT4)} \\ R_{cls2} &= \alpha_2 \cdot 6,693 \cdot 10^{(-7)} \cdot R_s^{1,246} \cdot (v1)^{1,85} && \text{(J.Gasparik1992)} \\ R_{cls3} &= \alpha_3 \cdot 9,964 \cdot 10^{(-9)} \cdot R_s^{1,058} \cdot (v1)^{2,446} && \text{(Di Leo, Pascale1994)} \end{aligned}$$

Dove:

- R_{cls} = resistenza del materiale
- R_s = valore medio totale dell'indice di rimbalzo
- v = velocità di propagazione
- α = coefficiente di normalizzazione = $\frac{R_{cls_{provino}}}{\delta * R_{s_{provino}}^{\beta} * v_{provino}^{\gamma}}$ (formula inversa)

Il Modulo Elastico del materiale sottoposto a prova verrà stimato con la seguente relazione:

$$E_o = \frac{Ed}{1.062}$$

$$Ed = \frac{(1+\delta)*(1-2\delta)}{(1-\delta)} * \frac{\gamma}{g} * V_m^2$$

Dove:

E_o = Modulo elastico

E_d = modulo elastico Dinamico

V_m = velocità ultrasonica

δ = Modulo di Poisson

γ = Peso specifico del calcestruzzo/muratura

g = accelerazione di gravità

4.6.4 Modulo Elastico Secante (Non distruttiva)

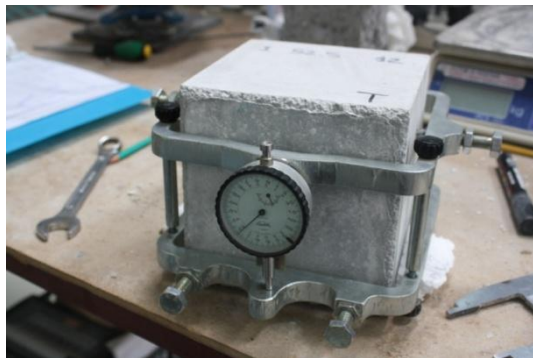
Il modulo elastico è il rapporto tra la tensione e la corrispondente deformazione misurata nella direzione della tensione. Per i materiali, come il calcestruzzo, per cui il diagramma *sforzi-deformazioni* non è rettilineo, si definisce modulo elastico secante fra due tensioni, quello determinato dalla pendenza della secante al diagramma sforzi-deformazioni tra le due tensioni considerate dopo un certo numero di cicli di carico.

La determinazione del modulo elastico secante è regolata dalla **UNI-EN 12390-13:2013** (ex UNI 6556:1976), la quale predispone la ricerca su un minimo di 3 provini della stessa tipologia.

Per le proprietà del calcestruzzo, come da norma, bisogna considerare l'intervallo di tensioni nel tratto elastico del diagramma sforzi/deformazioni, con una tensione di base diversa da zero. Pertanto, la determinazione dell'intervallo di tensione avviene nel seguente modo:

- Si considera la tensione di rottura a compressione σ_r sulla media di 3 provini appartenenti alla stessa tipologia;
- Si definisce la tensione al limite elastico σ_{el} , che è pari ai $\frac{2}{3}$ della tensione di rottura a compressione;
- Definita la tensione limite del tratto elastico, si suddivide quest'ultimo in tre porzioni uguali e si considera come *intervallo di tensione quello centrale*;
- Fissato l'intervallo di prova, l'intervallo fra la tensione massima di prova σ_i e la tensione di base σ_0 viene diviso in tre o più parti uguali, in modo da consentire letture a tensioni intermedie $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, ecc.

Per la misura delle deformazioni sono stati impiegati estensimetri a lettura manuale ancorati sulle facce del cubetto, come in figura sotto.



Per la valutazione del modulo secante è opportuno far riferimento alle letture di ritorno dei cicli stabilizzati. Il modulo di elasticità secante a compressione E_c fra due valori di tensione σ_0 e σ_i è dato da:

$$\frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_i - \sigma_0}{\varepsilon''}$$

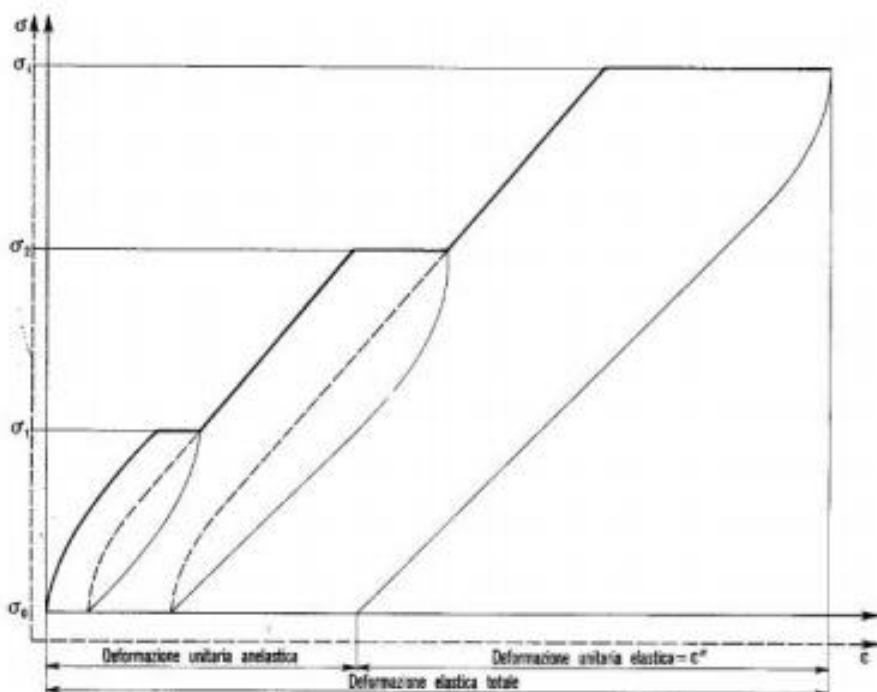
Dove:

$\Delta\sigma$ = è l'intervallo di tensione entro cui si opera;

σ_i = è la tensione superiore del ciclo di prova;

σ_0 = è la tensione di base;

$\Delta\varepsilon$ = è la variazione unitaria di lunghezza corrispondente a tale intervallo misurata, in fase di ritorno, a cicli completamente stabilizzati (indicata con ε'' *deformazione unitaria elastica* come riportato nel diagramma sottostante);



4.6.5 Profondità di penetrazione dell'acqua sotto pressione (Distruttiva)

Scopo della prova è determinare la profondità di penetrazione dell'acqua sotto pressione su provini cubici, cilindrici o prismatici con lunghezza dei lati o del diametro non minore di 150mm, di calcestruzzo indurito.

La modalità di prova è indicata dalla **UNI-EN 12390-8**, la quale indica la tipologia di apparecchiatura e le istruzioni di prova, omettendo il numero minimo di provini affinché la prova di penetrazione all'acqua risulti valida.

La prova deve iniziare quando il provino ha almeno raggiunto i 28 giorni di maturazione. Quando il provino di calcestruzzo è posto sull'apparecchiatura, su di un lato, viene applicata (evitando il lato di getto) l'acqua a pressione di $(500 \pm 50) \text{ kPa} = (5 \pm 0,5) \text{ bar}$ per $(72 \pm 2) \text{ h}$.

Dopo che la pressione è stata applicata per il tempo specificato, rimuovere il provino dall'apparecchiatura, asciugare la faccia sulla quale è stata applicata l'acqua in pressione, al fine di rimuovere l'eccesso di acqua, e spaccare il provino in due. Non appena la faccia

spezzata si è asciugata al punto tale che il fronte di penetrazione dell'acqua può essere chiaramente individuato, si registra il valore con precisione prossimo al millimetro.



La prova di profondità di penetrazione dell'acqua sotto pressione è stata valutata sulla *terna di cubetti* per ogni tipologia di mix previsti nella sperimentazione.

4.7 Analisi dei Risultati

In questo capitolo si analizzano i risultati dei test effettuati sul calcestruzzo autocompattante SCC per le variare tipologie di mix sia sulle caratteristiche reologiche allo stato fresco e sia sulle caratteristiche meccaniche allo stato indurito.

4.7.1 Analisi proprietà reologiche dell'autocompattante SCC

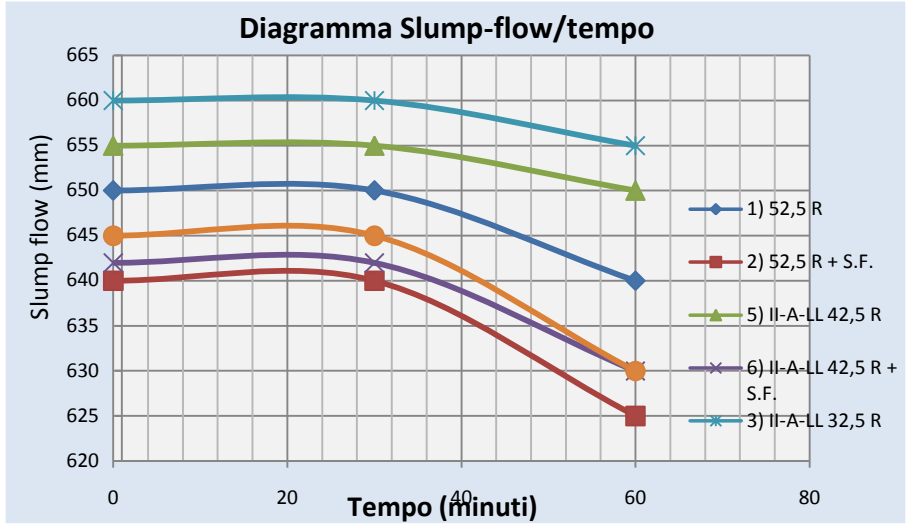
In questo paragrafo si analizzano in dettaglio le caratteristiche reologiche del calcestruzzo autocompattante dei mix oggetto della sperimentazione, grazie ai vari test di lavorabilità eseguiti su quest'ultimi:

➤ 4.7.1.1. Slump flow

Si analizza lo spandimento (slump-flow) del calcestruzzo autocompattante SCC al *tempo* 0', 30' e 60' minuti dal confezionamento per le varie tipologie di mix.

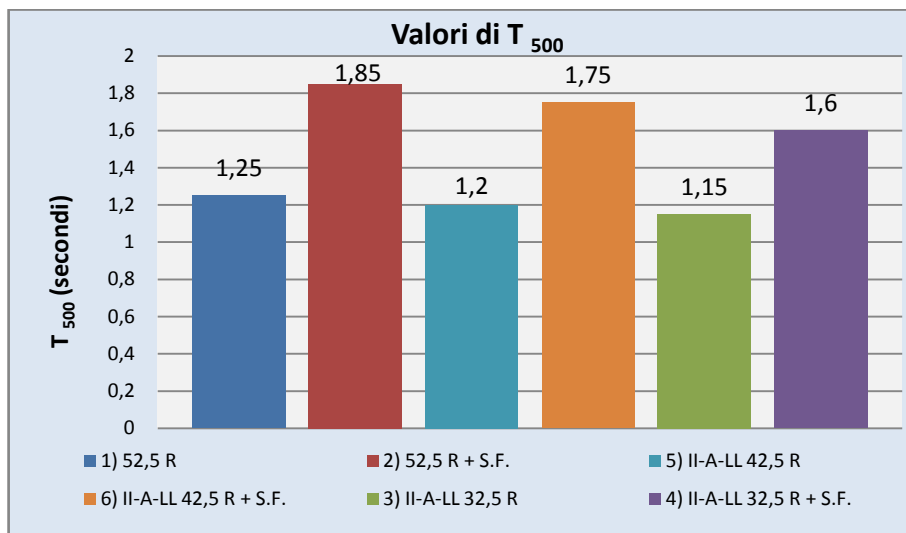
Tabella: Slump flow/tempo

Tipologia Mix	Slump-flow (mm)		
	t= 0'	t= 30'	t= 60'
1) I 52,5 R	650	650	640
2) I 52,5 R + S.F.	640	640	625
3) II-A-LL 32,5 R	660	660	655
4) II-A-LL 32,5 R + S.F.	645	645	630
5) II-A-LL 42,5 R	655	655	650
6) II-A-LL 42,5 R + S.F.	642	642	630



Il tempo T_{500} (s) affinché il calcestruzzo autocompattante arriva ai 500 mm è il seguente:

Tabella: Valori di T_{500}	
Tipologia Mix	T_{500} (secondi)
1) I 52,5 R	1,25
2) I 52,5 R + S.F.	1,85
3) II-A-LL 32,5 R	1,15
4) II-A-LL 32,5 R + S.F.	1,60
5) II-A-LL 42,5 R	1,20
6) II-A-LL 42,5 R + S.F.	1,75



Dai risultati esaminati per le sei tipologie di mix, si evince che:

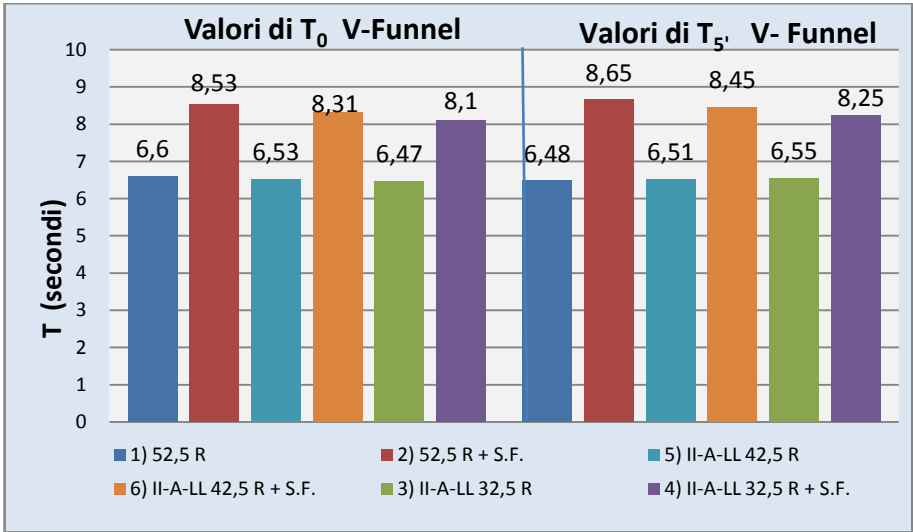
- Lo slump-flow supera il minimo richiesto dalla *UNI 11040* di 600 mm;
- La classe di spandimento prevista dalle Linee Guida è **SF1 (550 ÷ 650 mm)**;
- Il Tempo di spandimento a 500 mm T_{500} è di molto al di sotto del limite dei 12 secondi previsti dalla *UNI 11040*;
- La classe di fluidità prevista dalle Linee Guida è **VS1 < 2 secondi**;
- I mix con la presenza del fumo di silice danno luogo ad una diminuzione della **Fluidità** del calcestruzzo autocompattante

➤ 4.7.1.2. V Funnel

Si analizza il tempo di efflusso del calcestruzzo autocompattante SCC all'interno del V funnel al *tempo 0* e 5' minuti dal confezionamento per le varie tipologie di mix:

Tabella: Valori di T ₀	
Tipologia Mix	T ₀ (secondi)
1) I 52,5 R	6,6
2) I 52,5 R + S.F.	8,53
3) II-A-LL 32,5 R	6,47
4) II-A-LL 32,5 R + S.F.	8,1
5) II-A-LL 42,5 R	6,53
6) II-A-LL 42,5 R + S.F.	8,31

Tabella: Valori di T _{5'}	
Tipologia Mix	T _{5'} (secondi)
1) I 52,5 R	6,48
2) I 52,5 R + S.F.	8,65
3) II-A-LL 32,5 R	6,55
4) II-A-LL 32,5 R + S.F.	8,15
5) II-A-LL 42,5 R	6,51
6) II-A-LL 42,5 R + S.F.	8,45



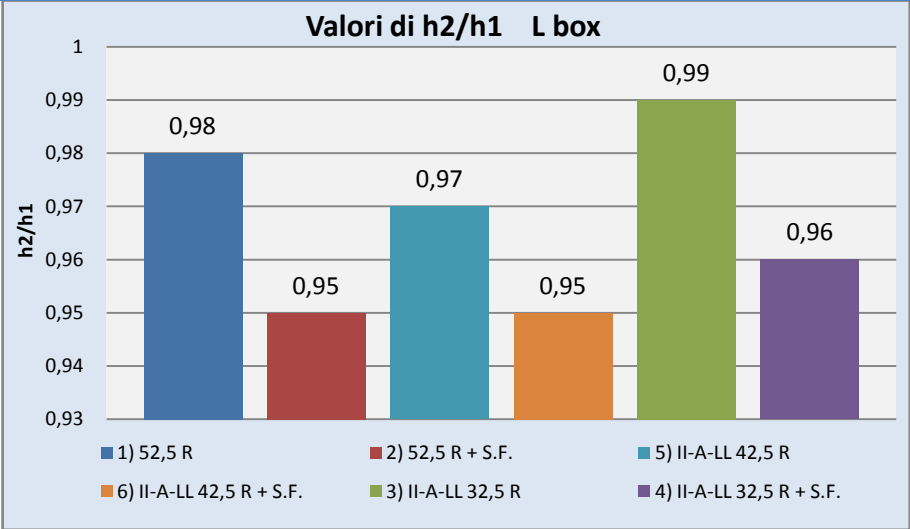
Dai risultati esaminati per le sei tipologie di mix, si evince che:

- Il tempo di svuotamento al V-Funnel è compreso nei $4 \div 12$ secondi, e la differenza di tempo di svuotamento $(t_5 - t_0) < 3$ secondi, come richiesto dalla *UNI 11040*;
- Il tempo di svuotamento al V-Funnel è ≤ 8 secondi, pertanto ricade nella classe **VF1** definita dalle Linee Guida;
- I mix con la presenza del fumo di silice danno luogo ad una diminuzione della ***Deformabilità*** allo stato fresco del calcestruzzo autocompattante, migliorandone la resistenza alla segregazione.

➤ 4.7.1.3. L box

Si analizza la capacità di attraversamento in spazi ristretti del calcestruzzo autocompattante SCC al tempo 0' dal confezionamento per le varie tipologie di mix:

Tabella: Valori di h_2/h_1 al tempo 0'	
Tipologia Mix	h_2/h_1
1) I 52,5 R	0,98
2) I 52,5 R + S.F.	0,95
3) II-A-LL 32,5 R	0,99
4) II-A-LL 32,5 R + S.F.	0,96
5) II-A-LL 42,5 R	0,97
6) II-A-LL 42,5 R + S.F.	0,95



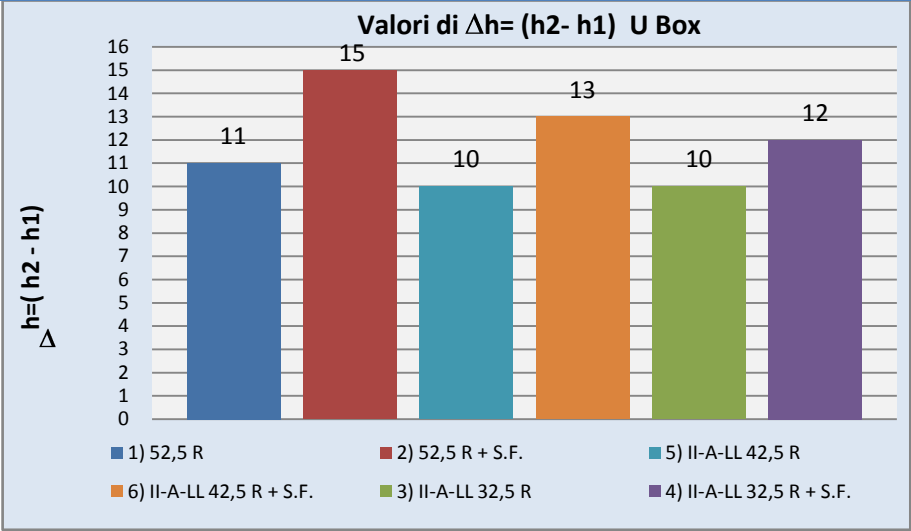
Dai risultati esaminati per le sei tipologie di mix, si evince che:

- Il rapporto h_2/h_1 è compresa fra $0,8 \div 1,0$ come richiesto dalla *UNI 11040*;
- Il rapporto h_2/h_1 è $> 0,80$, ed utilizzando un restringimento a 3 barre l'autocompattante ricade nella classe **PA2** (passing ability) della Linee Guida;
- I mix con la presenza del fumo di silice danno luogo ad una diminuzione della *Mobilità* in spazi ristretti allo stato fresco del calcestruzzo autocompattante.

➤ 4.7.1.4 U box

Si analizza la capacità di attraversamento in spazi ristretti del calcestruzzo autocompattante SCC al tempo 0' dal confezionamento per le varie tipologie di mix:

Tabella: Valori di $\Delta h = (h_2-h_1)$ al tempo 0'	
Tipologia Mix	$\Delta h=(h_2-h_1)$
1) I 52,5 R	11
2) I 52,5 R + S.F.	15
3) II-A-LL 32,5 R	10
4) II-A-LL 32,5 R + S.F.	12
5) II-A-LL 42,5 R	10
6) II-A-LL 42,5 R + S.F.	13



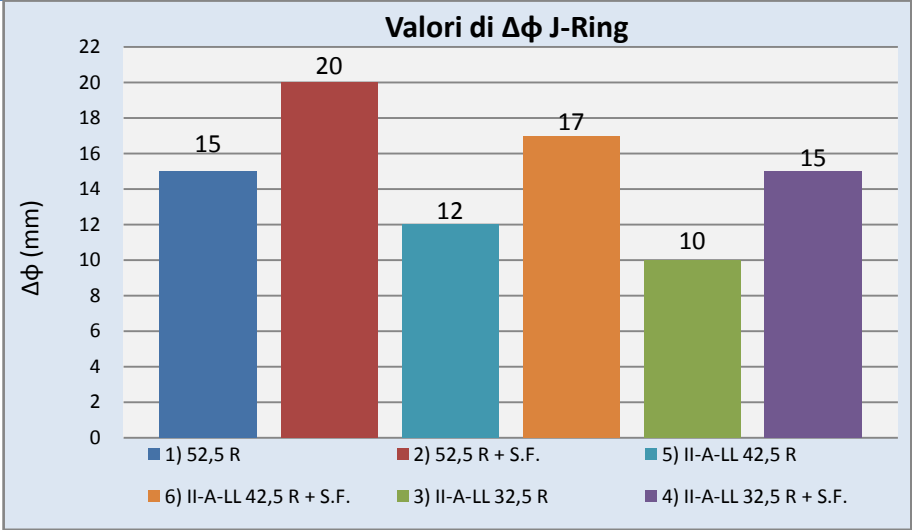
Dai risultati esaminati per le sei tipologie di mix, si evince che:

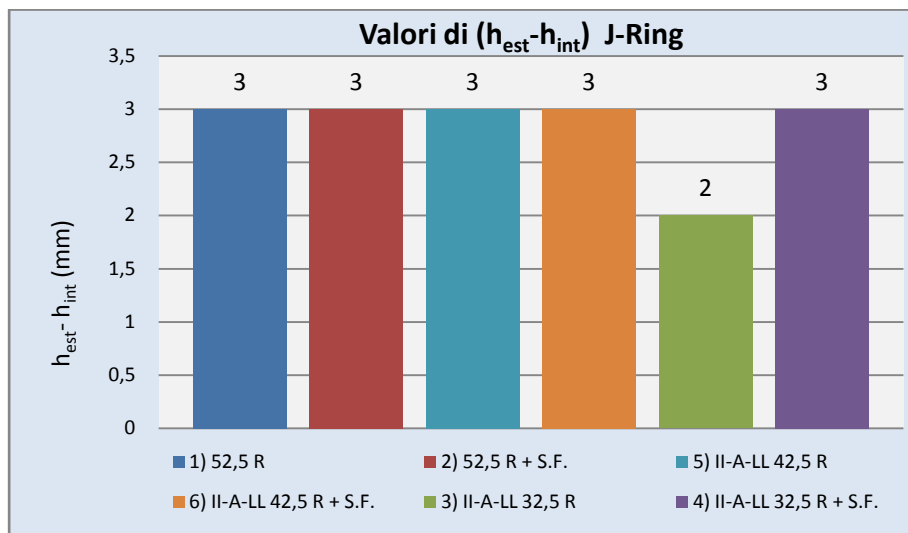
- La differenza $\Delta h = h_2-h_1$ è < di 30 mm come richiesto dalla *UNI 11040*;
- I mix con la presenza del fumo di silice danno luogo ad una diminuzione della *Mobilità* in spazi ristretti allo stato fresco del calcestruzzo autocompattante.

➤ 4.7.1.5. J-Ring

Si analizza la capacità di attraversamento in spazi ristretti del calcestruzzo autocompattante SCC al tempo 0' dal confezionamento per le varie tipologie di mix:

Tabella: Valori di spandimento, $\Delta\phi$, Δh al tempo 0'			
Tipologia Mix	Slump-flow (mm)	$\Delta\phi$ (mm)	$\Delta h=(h_{est}-h_{int})$ (mm)
1) I 52,5 R	635	15	3
2) I 52,5 R + S.F.	620	20	3
3) II-A-LL 32,5 R	650	10	2
4) II-A-LL 32,5 R + S.F.	630	15	3
5) II-A-LL 42,5 R	645	12	3
6) II-A-LL 42,5 R + S.F.	630	17	3





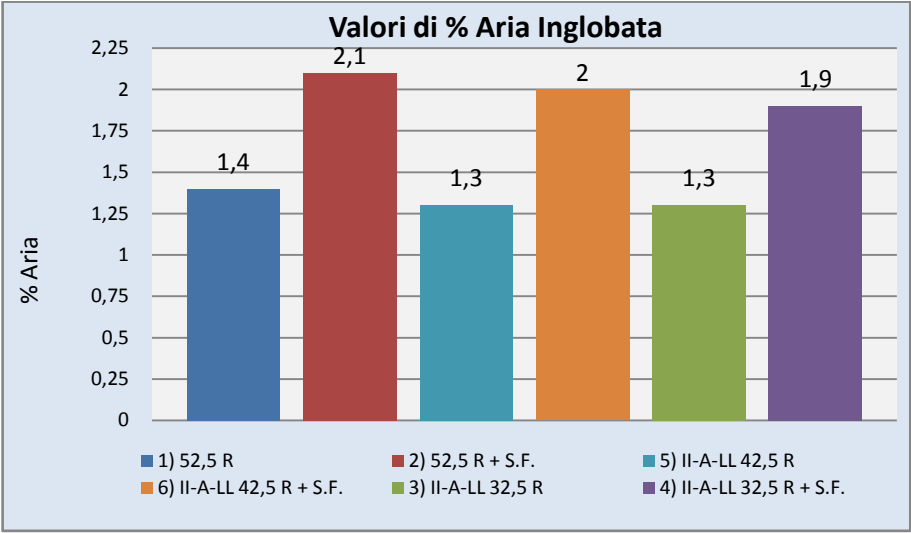
Dai risultati esaminati per le sei tipologie di mix, si evince che:

- La differenza $\Delta\phi$ di spandimento con e senza anello è $<$ di 50 mm come richiesto dalla *UNI 11040*;
- La differenza ($h_{est} - h_{int}$) all'interno ed all'esterno dell'anello è $<$ di 10 mm come richiesto dalla *UNI 11040*;
- La classe di mobilità in spazi ristretti, utilizzando nel test un anello a 16 barre, è la **PJ2** come definita dalle Linee Guida;
- I mix con la presenza del fumo di silice danno luogo ad una diminuzione della **Mobilità** in spazi ristretti allo stato fresco del calcestruzzo autocompattante.

➤ **4.7.1.6. Aria Inglobata**

Si analizza la % di aria inglobata in fase di confezionamento del calcestruzzo autocompattante SCC per le varie tipologie di mix:

Tabella: Valori % Aria inglobata	
Tipologia Mix	% Aria
1) I 52,5 R	1,4
2) I 52,5 R + S.F.	2,1
3) II-A-LL 32,5 R	1,3
4) II-A-LL 32,5 R + S.F.	1,9
5) II-A-LL 42,5 R	1,3
6) II-A-LL 42,5 R + S.F.	2



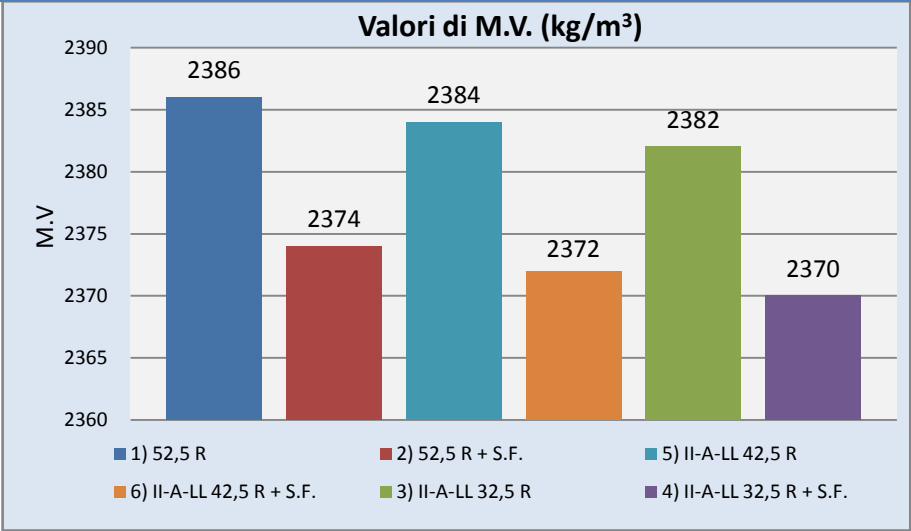
Dai risultati esaminati per le sei tipologie di mix, si evince che:

- I mix con la presenza del fumo di silice danno luogo ad un incremento di inglobamento d’aria allo stato fresco del calcestruzzo autocompattante.

➤ **4.7.1.7. Massa Volumica**

Si analizza la massa volumica reale in kg/m^3 allo stato fresco del calcestruzzo autocompattante SCC per le varie tipologie di mix:

Tabella: Valori Massa Volumica	
Tipologia Mix	M.V. (kg/m ³)
1) I 52,5 R	2386
2) I 52,5 R + S.F.	2374
3) II-A-LL 32,5 R	2382
4) II-A-LL 32,5 R + S.F.	2370
5) II-A-LL 42,5 R	2372
6) II-A-LL 42,5 R + S.F.	2384



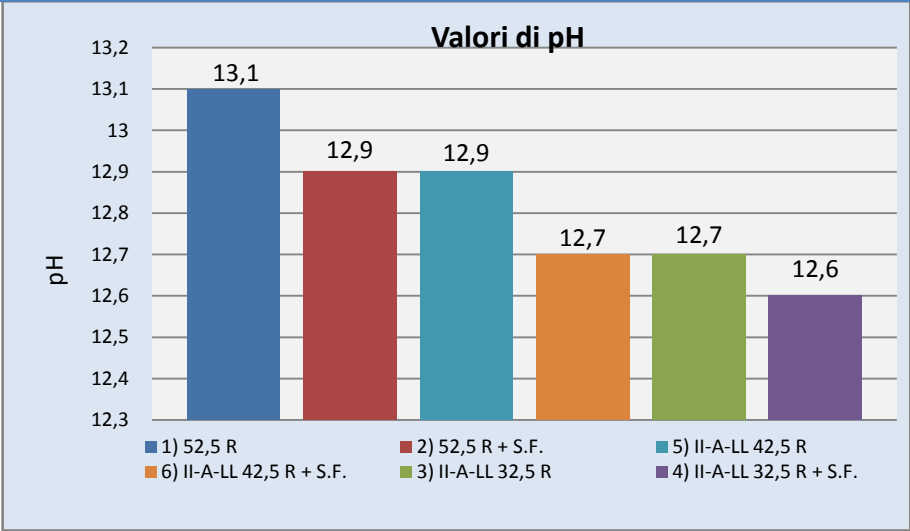
Dai risultati esaminati per le sei tipologie di mix, si evince che:

- I mix con la presenza del fumo di silice si presentano con una massa volumica minore allo stato fresco del calcestruzzo autocompattante, in quanto il peso specifico del fumo di silice in s.s.a (2,2 kg/l) è minore del filler (2,7 kg/l);

➤ 4.7.1.8. pH

Si analizza il pH allo stato fresco del calcestruzzo autocompattante SCC per le varie tipologie di mix:

Tabella: Valori pH	
Tipologia Mix	pH
1) I 52,5 R	13,1
2) I 52,5 R + S.F.	12,9
3) II-A-LL 32,5 R	12,7
4) II-A-LL 32,5 R + S.F.	12,6
5) II-A-LL 42,5 R	12,9
6) I-A-LL 42,5 R + S.F.	12,7



Dai risultati esaminati per le sei tipologie di mix, si evince che:

- I mix con la presenza del fumo di silice si presentano con valore di pH lievemente più basso allo stato fresco del calcestruzzo autocompattante.

4.7.1.9. Osservazioni proprietà Reologiche calcestruzzo autocompattante SCC

- Il calcestruzzo autocompattante con aggiunta di fumo di silice, risulta maggiormente *viscoso* con una conseguente riduzione della *fluidità* e della *mobilità in spazi ristretti* (es. armature).
- L'incremento viscoso del calcestruzzo fornisce a quest'ultimo un miglioramento del fenomeno di segregazione e Bleeding, pertanto durante la fase di confezionamento dei mix 2), 4) e 6) si è stabilito di omettere l'utilizzo di additivo viscosizzante (V.M.A.)
- L'utilizzo del fumo di silice nel calcestruzzo richiede una maggior richiesta d'acqua, di conseguenza nei mix 2), 4) e 6) per non alterare il rapporto *a/c* ci si è avvalsi dell'utilizzo di additivi superfluidificanti.
- L'aria inglobata dal calcestruzzo autocompattante nella fase di confezionamento per i mix 2), 4) e 6) risulta nettamente maggiore rispetto agli altri mix, aumento causato dall'utilizzo eccessivo di additivi superfluidificanti e dal fatto che il calcestruzzo essendo più viscoso trova difficoltà ad espellere l'aria inglobata.
- L'incremento di viscosità, la diminuzione del bleeding e del fenomeno della segregazione, la maggior richiesta d'acqua da parte dei mix con aggiunta di fumo di silice, è motivata dal fatto che quest'ultimo ha una ***Superficie specifica*** elevatissima pari a ***20÷30 m²/g*** ($200 \div 300 * 10^3 \text{ cm}^2/\text{g}$ al Blaine) maggiore rispetto ad un *Cemento Portland* di ***0,2÷0,5 m²/g*** ($2000 \div 5000 \text{ cm}^2/\text{g}$ al Blaine), consentendo ai granuli di fumo di silice di collocarsi tra i granuli più grossi del cemento per creare una struttura estremamente compatta che lascia a disposizione all'acqua uno spazio ridottissimo.
- Il calcestruzzo autocompattante per le sei tipologie di mix, rispetta le Linee Guida del calcestruzzo alle seguenti classi: **SF1, VS1, VF1, PA2, PJ2.**

4.7.2 Analisi proprietà *meccaniche* dell'autocompattante SCC

In questo paragrafo si analizzano in dettaglio le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo autocompattante dei mix oggetto della sperimentazione, grazie ai vari test *distruttivi/non distruttivi* eseguiti su quest'ultimi:

- 4.7.2.1. Resistenza Meccanica a compressione *UNI 12390-3 (Distruttiva)*

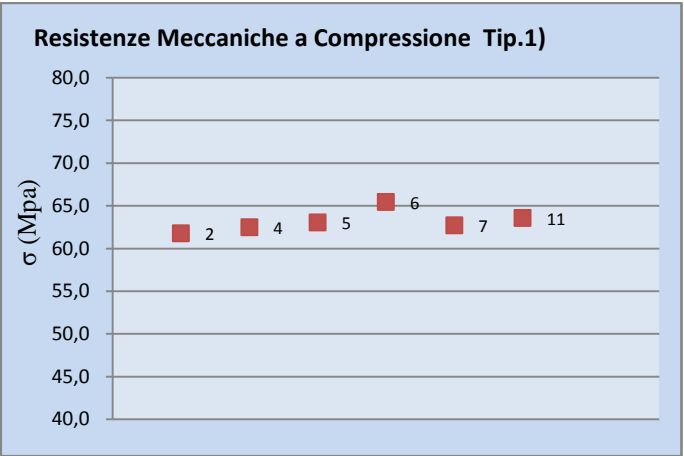
Si analizza la resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo autocompattante SCC per le varie tipologie di mix:

➤ **Tip . 1) I 52,5 R**

Tip.1) I 52,5 R	n° Cub.	Rett.ca	Dimensioni (mm)			Area	Massa	M.Vol.	F _{rott.}	σ _{rott.}	DataProva
		Si/No	a	b	h	mm²	Kg	Kg/m³	KN	Mpa	
	2	No	150	150	150	22500	8.068	2391	1390.2	61.8	02/09/2014
	4	No	150	150	150	22500	8.096	2399	1405.9	62.5	02/09/2014
	5	No	150	150	150	22500	8.113	2404	1419.11	63.1	02/09/2014
	6	No	150	150	150	22500	8.067	2390	1472.95	65.5	02/09/2014
	7	No	150	150	150	22500	8.11	2403	1410.78	62.7	02/09/2014
	11	No	150	150	150	22500	8.062	2389	1430.93	63.6	02/09/2014

In accordo al controllo di accettazione del calcestruzzo Tipo A (NTC 08, 11.2.5. e 11.2.5.1.) ci si calcola la resistenza media del calcestruzzo:

Resistenza Media a Compressione				
Prelievo	n° Cub.	σ	$\sigma_{media\ prelievi}$	σ_{media}
		Mpa	Mpa	Mpa
P ₁	2	61.8	62.1	63.2
	4	62.5		
P ₂	5	63.1	64.3	
	6	65.5		
P ₃	7	62.7	63.1	
	11	63.6		



Per determinare la classe di resistenza a compressione corrispondente alla Tipologia di mix 1), si utilizza la formula di normativa per il controllo di accettazione Tipo A:

$$\mathbf{R_{cm28} \geq R_{ck} + 3,5}$$

$$\mathbf{R_1 \geq R_{ck} - 3,5}$$

dove:

- $\mathbf{R_{cm28}}$ rappresenta la resistenza media cubica a compressione (Mpa);
- $\mathbf{R_1}$ rappresenta la resistenza minima cubica a compressione dei prelievi (Mpa);
- $\mathbf{R_{ck}}$ rappresenta la resistenza caratteristica cubica a compressione (Mpa), definita dall'NTC 08 (11.2.1) come la resistenza per il quale si ha il 5% di probabilità di trovare valori inferiori;

Il valore di $\mathbf{R_{ck}}$ si ricava nel seguente modo:

$$\mathbf{R_{ck} = R_{cm28} - 3,5 = 63,2 - 3,5 = 59,7 \text{ Mpa} \approx 55 \text{ Mpa}}$$

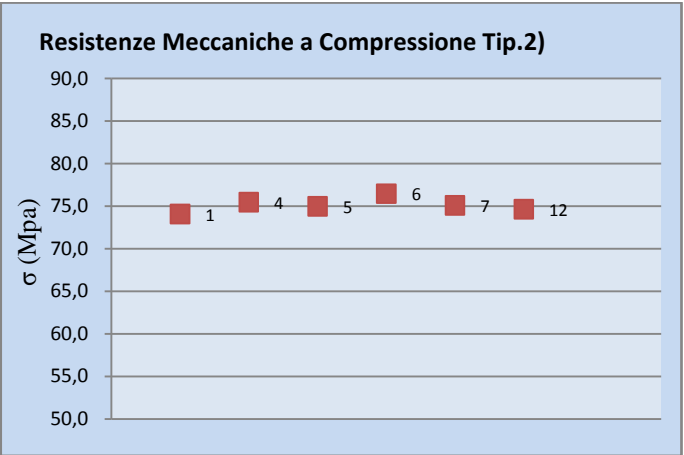
La Classe di resistenza della **Tip.1)** è: **C 45/55**

➤ **Tip . 2) I 52,5 R + S.F.**

Prove di Resistenza a Compressione											
Tip.2) I 52,5 R + S.F.	n° Cub.	Rettifica	Dimensioni (mm)			Area	Massa	M.Vol.	F rott.	σ	Data di Prova
		Si/No	a	b	h	mm ²	Kg	Kg/m ³	KN	Mpa	
	1	No	149	149	150	22201	7.92	2377	1644.65	74.1	02/09/2014
	4	No	150	150	150	22500	7.96	2359	1698.27	75.5	02/09/2014
	5	No	150	150	150	22500	8.05	2385	1687.22	75.0	02/09/2014
	6	No	149	149	150	22201	7.95	2988	1698.01	76.5	02/09/2014
	7	No	149	149	150	22201	7.98	2397	1667.25	75.1	02/09/2014
	12	No	150	150	150	22500	8.03	2380	1679.55	74.6	02/09/2014

In accordo al controllo di accettazione del calcestruzzo Tipo A (NTC 08, 11.2.5. e 11.2.5.1.) ci si calcola la resistenza media del calcestruzzo:

Resistenza Media a Compressione				
Prelievo	n° Cub.	σ	σ _{media prelievi}	σ _{media}
		Mpa	Mpa	Mpa
P ₁	1	74.1	74.8	75.1
	4	75.5		
P ₂	5	75.0	75.7	
	6	76.5		
P ₃	7	75.1	74.9	
	12	74.6		



Per determinare la classe di resistenza a compressione corrispondente alla Tipologia di mix 2), si utilizza la formula di normativa per il controllo di accettazione Tipo A:

Il valore di R_{ck} si ricava nel seguente modo:

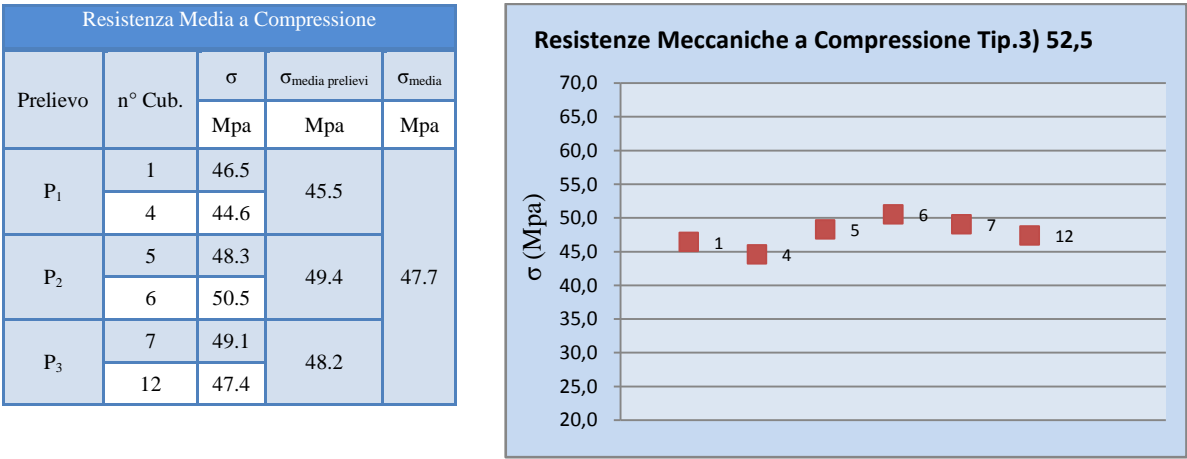
$$R_{ck} = R_{cm28} - 3,5 = 75,1 - 3,5 = 71,6 \text{ Mpa} \approx 67 \text{ Mpa}$$

La Classe di resistenza della **Tip.2)** è: **C 55/67**

➤ **Tip . 3) II-A-LL 32,5 R**

Prove di Resistenza a Compressione											
Tip.3) II-A-LL 32,5 R	n° Cub.	Rettifica	Dimensioni (mm)			Area	Massa	M.Vol.	F rott.	σ	Data di Prova
		Si/No	a	b	h	mm²	Kg	Kg/m³	KN	Mpa	
	1	No	151	150	150	22650	8.19	2409	1052.4	46.5	02/09/2014
	3	No	151	150	150	22650	8.16	2402	1010.3	44.6	02/09/2014
	5	No	149	149	150	22201	7.95	2387	1072.6	48.3	02/09/2014
	6	No	150	150	150	22500	8.08	2393	1137.2	50.5	02/09/2014
	7	No	149	150	150	22350	8.02	2393	1096.93	49.1	02/09/2014
	12	No	149	150	150	22350	7.99	2382	1059.38	47.4	02/09/2014

In accordo al controllo di accettazione del calcestruzzo Tipo A (NTC 08, 11.2.5. e 11.2.5.1.) ci si calcola la resistenza media del calcestruzzo:



Per determinare la classe di resistenza a compressione corrispondente alla Tipologia di mix 3), si utilizza la formula di normativa per il controllo di accettazione Tipo A:

Il valore di R_{ck} si ricava nel seguente modo:

$$R_{ck} = R_{cm28} - 3,5 = 47,7 - 3,5 = 44,2 \text{ Mpa} \approx 40 \text{ Mpa}$$

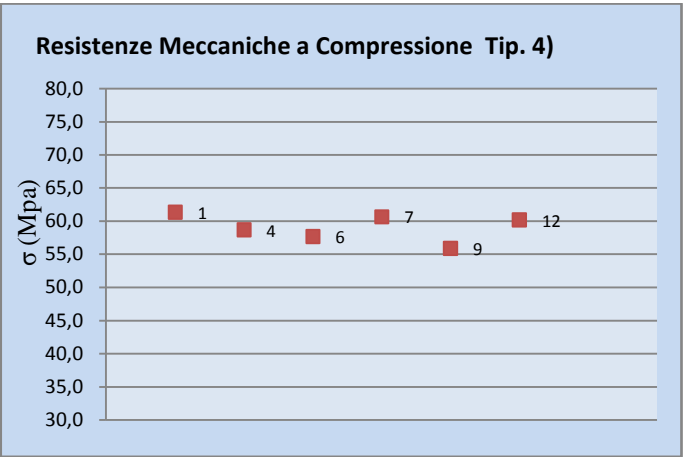
La Classe di resistenza della **Tip.3)** è: **C 32/40**

➤ **Tip . 4) II-A-LL 32,5 R + S.F.**

Prove di Resistenza a Compressione											
Tip.4) II-A-LL 32,5 R + S.F.	n° Cub.	Rettifica	Dimensioni (mm)			Area	Massa	M.Vol.	F rott.	σ	Data di Prova
		Si/No	a	b	h	mm ²	Kg	Kg/m ³	KN	Mpa	
	1	No	150	151	149	22650	7.97	2362	1389.16	61.3	02/09/2014
	4	No	149	150	149	22350	7.80	2343	1310.97	58.7	02/09/2014
	6	No	150	149	150	22350	7.85	2342	1288.48	57.7	02/09/2014
	7	No	150	149	150	22350	7.92	2361	1355.99	60.7	02/09/2014
	9	No	149	150	149	22350	7.89	2370	1248.74	55.9	02/09/2014
	12	No	149	149	150	22201	8.04	2415	1335.9	60.2	02/09/2014

In accordo al controllo di accettazione del calcestruzzo Tipo A (NTC 08, 11.2.5. e 11.2.5.1.) ci si calcola la resistenza media del calcestruzzo:

Resistenza Media a Compressione				
Prelievo	n° Cub.	σ	σ _{media prelievi}	σ _{media}
		Mpa	Mpa	Mpa
P ₁	1	61.3	60.0	59.1
	4	58.7		
P ₂	6	57.7	59.2	
	7	60.7		
P ₃	9	55.9	58.0	
	12	60.2		



Per determinare la classe di resistenza a compressione corrispondente alla Tipologia di mix 4), si utilizza la formula di normativa per il controllo di accettazione Tipo A:

Il valore di R_{ck} si ricava nel seguente modo:

$$R_{ck} = R_{cm28} - 3,5 = 59,1 - 3,5 = 55,6 \text{ Mpa} \approx 50 \text{ Mpa}$$

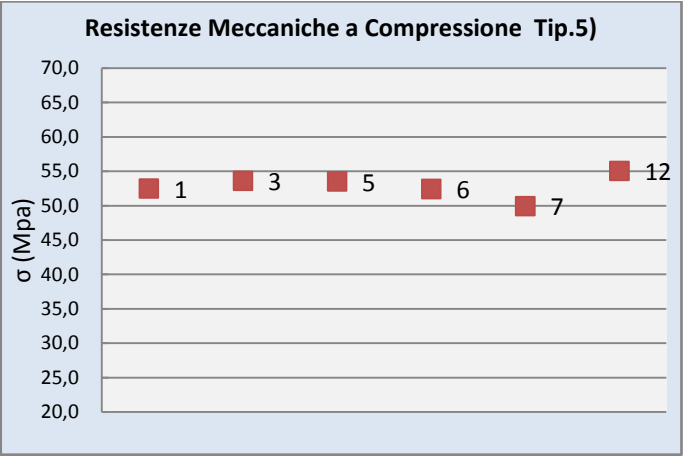
La Classe di resistenza della **Tip.4)** è: **C 40/50**

➤ **Tip . 5) II-A-LL 42,5 R**

Prove di Resistenza a Compressione											
Tip.5) II-A-LL 42,5 R	n° Cub.	Rettifica	Dimensioni (mm)			Area	Massa	M.Vol.	F rott.	σ	Data di Prova
		Si/No	a	b	h	mm ²	Kg	Kg/m ³	KN	Mpa	
	1	No	150	153	150	22950	8,02	2328	1205	52,5	07/02/2015
	3	No	150	152	150	22800	8,00	2339	1222,32	53,6	07/02/2015
	5	No	150	151	150	22650	8,01	2356	1212	53,5	07/02/2015
	6	No	150	151,5	150	22725	7,87	2309	1191,36	52,4	07/02/2015
	7	No	150	151,5	150	22725	7,90	2316	1134,66	49,9	07/02/2015
	12	No	150	150,5	150	22575	8,01	2365	1243	55,1	07/02/2015

In accordo al controllo di accettazione del calcestruzzo Tipo A (NTC 08, 11.2.5. e 11.2.5.1.) ci si calcola la resistenza media del calcestruzzo:

Resistenza Media a Compressione				
Prelievo	n° Cub.	σ	σ _{media prelievi}	σ _{media}
		Mpa	Mpa	Mpa
P ₁	1	52,5	53,1	52.8
	3	53,6		
P ₂	5	53,5	53,0	
	6	52,4		
P ₃	7	49,9	52,5	
	12	55,1		



Per determinare la classe di resistenza a compressione corrispondente alla Tipologia di mix 5), si utilizza la formula di normativa per il controllo di accettazione Tipo A:

Il valore di R_{ck} si ricava nel seguente modo:

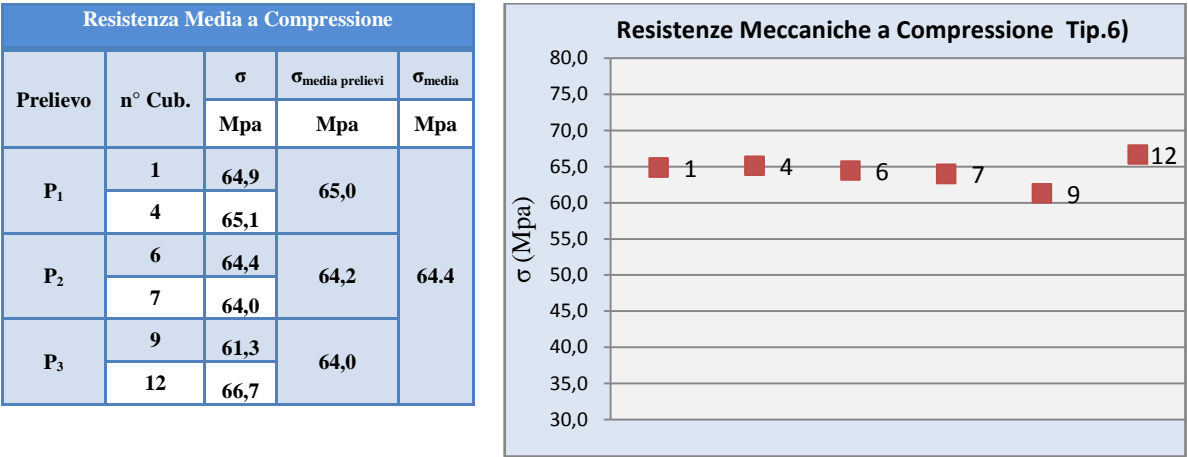
$$R_{ck} = R_{cm28} - 3,5 = 52,8 - 3,5 = 49.3 \text{ Mpa} \approx 45 \text{ Mpa}$$

La Classe di resistenza della **Tip.5)** è: **C 35/45**

➤ **Tip . 6) II-A-LL 42,5 R + S.F.**

Prove di Resistenza a Compressione											
Tip.6) II-A-LL 42,5 R + S.F.	n° Cub.	Rettifica	Dimensioni (mm)			Area	Massa	M.Vol.	F rott.	σ	Data di Prova
		Si/No	a	b	h	mm ²	Kg	Kg/m ³	KN	Mpa	
	1	No	150	149	150	22350	7,91	2359	1450	64,9	07/03/2015
	4	No	150	150	150	22500	7,85	2326	1465	65,1	07/03/2015
	6	No	150	150	150	22500	7,90	2341	1450	64,4	07/03/2015
	7	No	150	149	150	22350	8,90	2655	1430	64,0	07/03/2015
	9	No	149	150	150	22350	7,92	2362	1370	61,3	07/03/2015
	12	No	149	149	150	22201	8,00	2402	1480	66,7	07/03/2015

In accordo al controllo di accettazione del calcestruzzo Tipo A (NTC 08, 11.2.5. e 11.2.5.1.) ci si calcola la resistenza media del calcestruzzo:



Per determinare la classe di resistenza a compressione corrispondente alla Tipologia di mix 6), si utilizza la formula di normativa per il controllo di accettazione Tipo A:

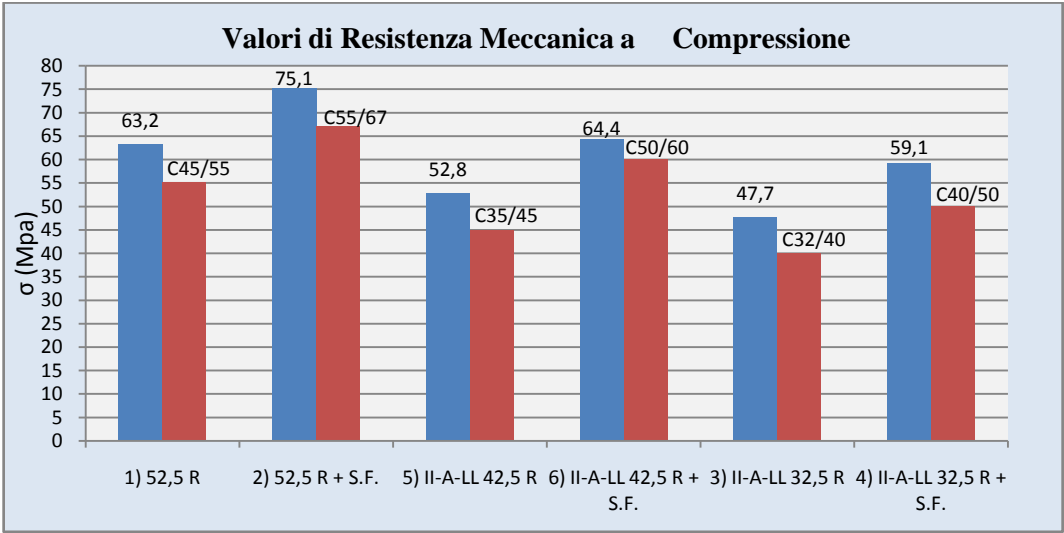
Il valore di R_{ck} si ricava nel seguente modo:

$$R_{ck} = R_{cm28} - 3,5 = 64,4 - 3,5 = 60,9 \text{ Mpa} \approx 60 \text{ Mpa}$$

La Classe di resistenza della **Tip.6)** è: **C 50/60**

Di seguito si rappresenta il confronto di resistenza meccanica a compressione e i valori di R_{ck} per le varie tipologie di mix:

Tabella: Valori di Resistenza Meccanica a Compressione		
Tipologia Mix	σ_{media} (Mpa)	Classe
1) I 52,5 R	63,2	C45/55
2) I 52,5 R + S.F.	75,1	C55/67
3) II-A-LL 32,5 R	47,7	C32/40
4) II-A-LL 32,5 R + S.F.	59,1	C40/50
5) II-A-LL 42,5 R	52,8	C35/45
6) II-A-LL 42,5 R + S.F.	64,4	C50/60



Dalla tabella sopra riportata, si evince come la presenza del fumo di silice in aggiunta al cemento, produci un incremento di resistenza meccanica a compressione del **18%** rispetto alla *tip.1*) , il **22 %** rispetto alla *tip.3*) e il **22 %** rispetto alla *tip.5*) con un miglioramento per la classe di cemento di miscela al Calcare (II-A-LL); l'utilizzo di una classe di cemento è subordinata al valore di R_{ck} che si deve conseguire.

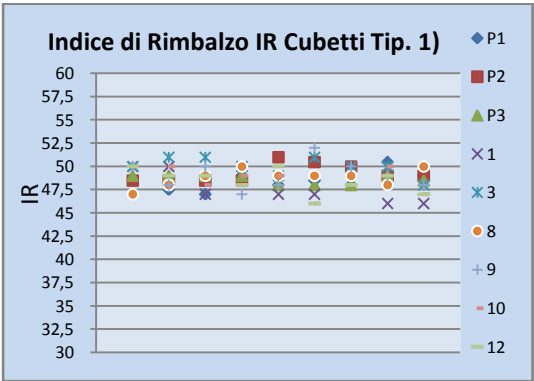
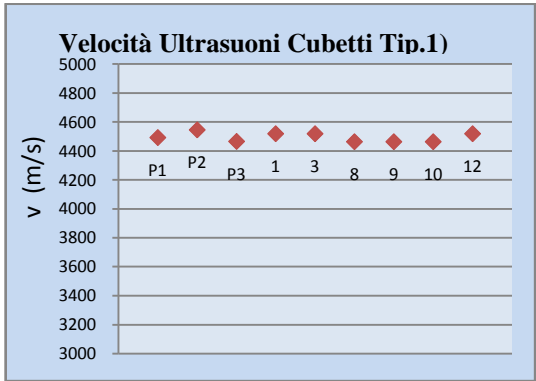
4.7.2.2. Resistenza Meccanica a compressione METODO SON-REB *UNI 12504-2-4*
(*Non Distruttiva*)

Si riportano di seguito le resistenze meccaniche a compressione ottenuti con il metodo SON-REB, per le varie tipologie di mix:

➤ **Tip . 1) I 52,5 R**

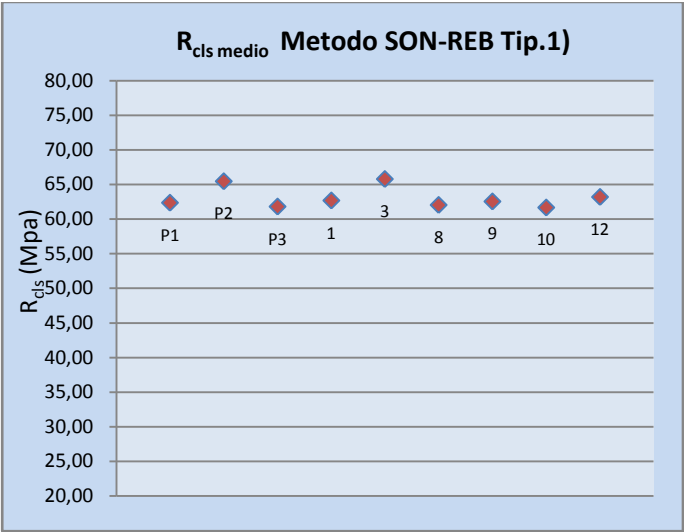
Metodo SON-REB Tip.1) I 52,5 R													
-	Prova Ultrasuoni		Prova Sclerometrica										
Sigla n°	Velocità	Velocità media	Indice di Rimbalzo IR per ogni battuta										
	m/s	m/s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	IR Medio	IR Finale
P1	4491.2	4494.3	48.5	47.5	47	49	48	48.5	48	50.5	49	48.44	48.81
P2	4545.6		48.5	48.5	48.5	48.5	51	50.5	50	49	49	49.28	
P3	4464.9		49	49	49	49	48	48	48	49	48.5	48.61	
1	4518.1		50	50	47	50	47	47	50	46	46	48.11	
3	4518.1		50	51	51	50	49	51	50	50	48	50.00	
8	4464.3		47	48	49	50	49	49	49	48	50	48.78	
9	4464.3		50	48	50	47	48	52	50	49	48	49.11	
10	4464.3		50	50	48	49	49	46	48	50	47	48.56	
12	4518.1		50	49	49	48	50	46	48	49	47	48.44	

Con P1,P2,P3, si specifica che i valori di velocità (m/s) ed Indice di Rimbalzo (IR) sono media di due cubetti del singolo prelievo oggetto di prove distruttive.



TARATURA PROCEDIMENTO												
N.	IR medio	prova	ultrasuoni			R _c	R _{cls 1}	R _{cls 2}	R _{cls 3}	α1	α2	α3
			d	ritardo	V1	Cubo	MPa	MPa	MPa	Rc/Rcls1	Rc/Rcls2	Rc/Rcls3
			cm	sec-6	m/sec	MPa						
P1	48.44	diretta	15	33.40	4491.2	62.14	566.1	481.2	518.9	0.110	0.129	0.120
P2	49.28	diretta	15	33.00	4545.6	64.27	598.6	502.6	544.2	0.107	0.128	0.118
P3	48.61	diretta	15	33.60	4464.9	63.15	560.4	478.0	513.4	0.113	0.132	0.123

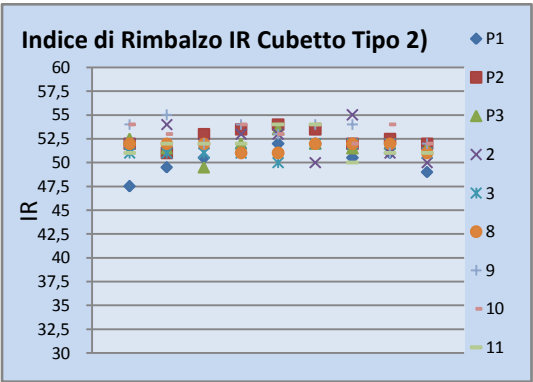
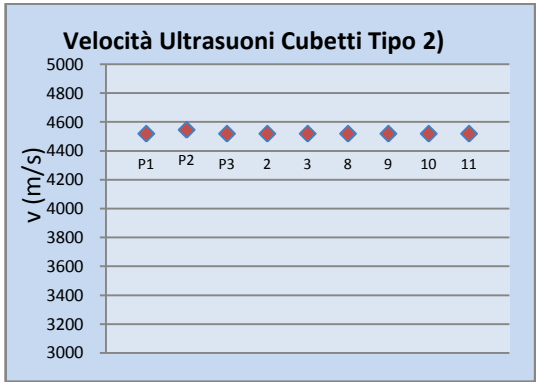
R _{cls} Metodo SON-REB TIP.1) I 52,5 R				
Sigla n°	R _{cls}	R _{cls}	R _{cls}	R _{cls}
	1	2	3	medio
	MPa	MPa	MPa	MPa
P1	62.24	62.41	62.42	62.35
P2	65.81	65.19	65.45	65.48
P3	61.61	62.00	61.75	61.79
1	62.57	62.56	62.87	62.67
3	66.17	65.64	65.49	65.76
8	61.89	62.25	61.95	62.03
9	62.51	62.78	62.40	62.56
10	61.48	61.90	61.66	61.68
12	63.20	63.10	63.33	63.21
R _{medio}	63.05	63.09	63.04	63.06



La resistenza a compressione del calcestruzzo valutata con il Metodo SON-REB è di **R_{cls} = 63,06 MPa**, con uno scarto del **0,22 %** rispetto alla resistenza cubica ottenuta dalle rotture dei cubetti.

➤ Tip . 2) I 52,5 R + S.F.

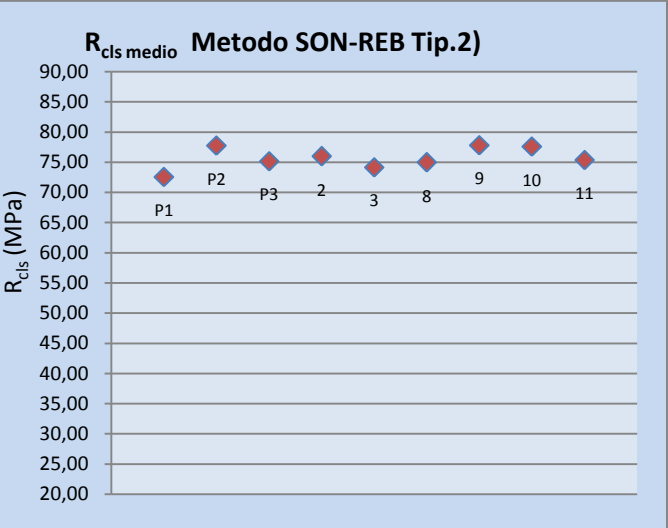
Metodo SON-REB Tip.2)													
-	Prova Ultrasuoni		Prova Sclerometrica										
Sigla n°	Velocità	Velocità <small>media</small>	Indice di Rimbalzo IR per ogni battuta										
	m/s	m/s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	IR Medio	IR Finale
P1	4518.1	4521.1	47.5	49.5	50.5	51	52	52	50.5	51	49	50.33	52.01
P2	4545.6		52	51	53	53.5	54	53.5	52	52.5	52	52.61	
P3	4518.1		52.5	51.5	49.5	52	53.5	52	51.5	52	51.5	51.78	
2	4518.1		52	54	52	53	53	50	55	51	50	52.22	
3	4518.1		51	51	51	51	50	52	52	52	51	51.22	
8	4518.1		52	52	52	51	51	52	52	52	51	51.67	
9	4518.1		54	55	52	54	53	54	54	51	52	53.22	
10	4518.1		54	53	52	54	53	54	52	54	52	53.11	
11	4518.1		51	52	52	52	54	54	50	51	51	51.89	



TARATURA PROCEDIMENTO												
N.	IR medio	prova	ultrasuoni			R _c	R _{cls 1}	R _{cls 2}	R _{cls 3}	α1	α2	α3
			d	ritardo	V1	Cubo	MPa	MPa	MPa	Rc/Rcls1	Rc/Rcls2	Rc/Rcls3
			cm	sec-6	m/sec	MPa						
P1	50.33	diretta	15	33.2	4518	74.78	607.7	510.3	548.3	0.123	0.147	0.136
P2	52.61	diretta	15	33	4546	75.73	658.2	545.3	583.2	0.115	0.139	0.130
P3	51.78	diretta	15	33.2	4518	74.87	633.1	528.6	565.0	0.118	0.142	0.133

R_{cls} Metodo SON-REB TIP.2) I 52,5 R + S.F.

Sigla n°	R _{cls}	R _{cls}	R _{cls}	R _{cls}
	1	2	3	medio
	MPa	MPa	MPa	MPa
P1	72.19	72.64	72.88	72.57
P2	78.19	77.63	77.52	77.78
P3	75.21	75.25	75.10	75.19
2	76.15	76.06	75.78	75.99
3	74.04	74.24	74.24	74.18
8	74.98	75.05	74.93	74.98
9	78.27	77.87	77.32	77.82
10	78.04	77.67	77.14	77.62
11	75.45	75.45	75.27	75.39
R _{medio}	75.83	75.76	75.58	75.72

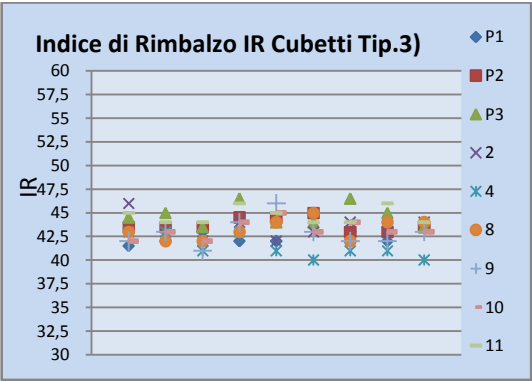
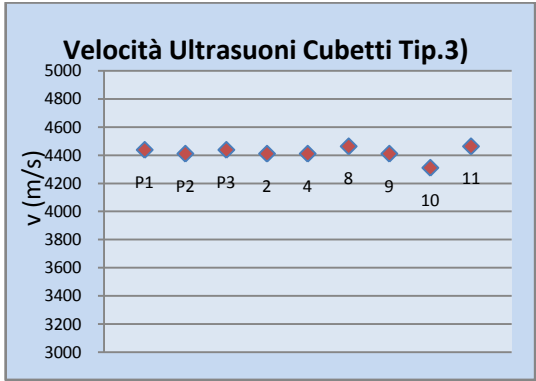


La resistenza a compressione del calcestruzzo valutata con il Metodo SON-REB è di **R_{cls} = 75,72 MPa**, con uno scarto del **0,82 %** rispetto alla resistenza cubica ottenuta dalle rotture dei cubetti.

➤ Tip . 3) II-A-LL 32,5 R

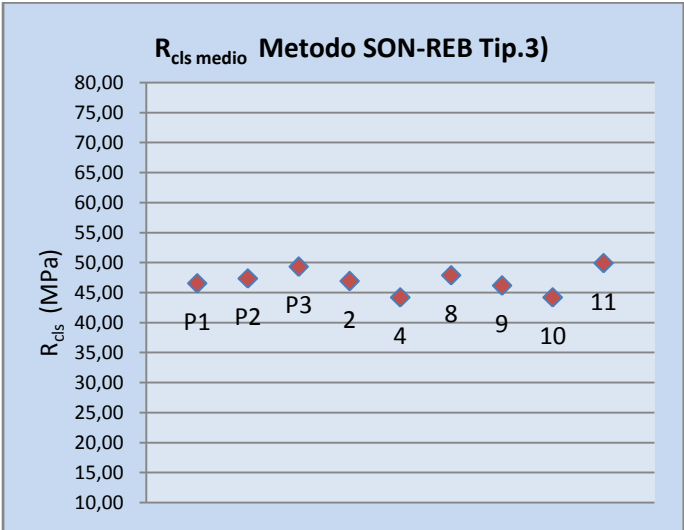
Metodo SON-REB Tip.3)

-	Prova Ultrasuoni		Prova Sclerometrica										
Sigla n°	Velocità	Velocità _{media}	Indice di Rimbalzo IR per ogni battuta										
	m/s	m/s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	IR _{Medio}	IR _{Finale}
P1	4438	4418.0	41.5	42	43	42	42	45	43	42	44	42.72	43.35
P2	4411.8		43.5	43.5	43.5	44.5	44.5	45	43	43	43.5	43.78	
P3	4438		44.5	45	43.5	46.5	44	44	46.5	45	43.5	44.72	
2	4411.8		46	43	42	44	42	43	44	43	44	43.44	
4	4411.8		43	43	41	43	41	40	41	41	40	41.44	
8	4464.3		43	42	42	43	44	45	42	44	44	43.22	
9	4411.8		42	43	41	44	46	43	42	42	43	42.89	
10	4310.3		42	43	42	44	45	43	44	43	43	43.22	
11	4464.3		45	44	44	46	45	44	44	46	44	44.67	



TARATURA PROCEDIMENTO												
N.	IR medio	prova	ultrasuoni			R _c	R _{cls 1}	R _{cls 2}	R _{cls 3}	α1	α2	α3
			d	ritardo	V1	Cubo						
			cm	sec-6	m/sec	MPa	MPa	MPa	MPa	Rc/Rcls1	Rc/Rcls2	Rc/Rcls3
P1	42.7	diretta	15	33.8	4438	45.53	457.5	402.5	441.3	0.100	0.113	0.103
P2	43.8	diretta	15	34	4412	49.44	466.8	410.4	446.3	0.106	0.120	0.111
P3	44.7	diretta	15	33.8	4438	48.24	488.9	426.1	463.1	0.099	0.113	0.104

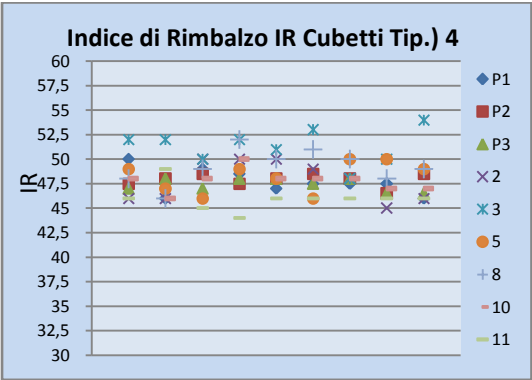
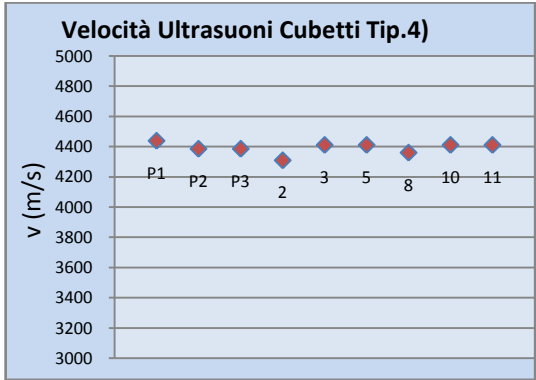
R _{cls} Metodo SON-REB TIP.3) II-A-LL 32,5 R				
Sigla n°	Rcls	Rcls	Rcls	Rcls
	1	2	3	medio
	MPa	MPa	MPa	MPa
P1	46.38	46.53	46.79	46.57
P2	47.32	47.44	47.32	47.36
P3	49.56	49.26	49.11	49.31
2	46.80	46.99	46.94	46.91
4	43.70	44.31	44.66	44.23
8	47.89	47.73	48.06	47.89
9	45.93	46.24	46.31	46.16
10	43.74	44.73	44.11	44.19
11	50.23	49.72	49.76	49.90
R _{medio}	46.84	46.99	47.01	46.95



La resistenza a compressione del calcestruzzo valutata con il Metodo SON-REB è di **$R_{cls} = 46,95 \text{ MPa}$** , con uno scarto del **1,58 %** rispetto alla resistenza cubica ottenuta dalle rotture dei cubetti.

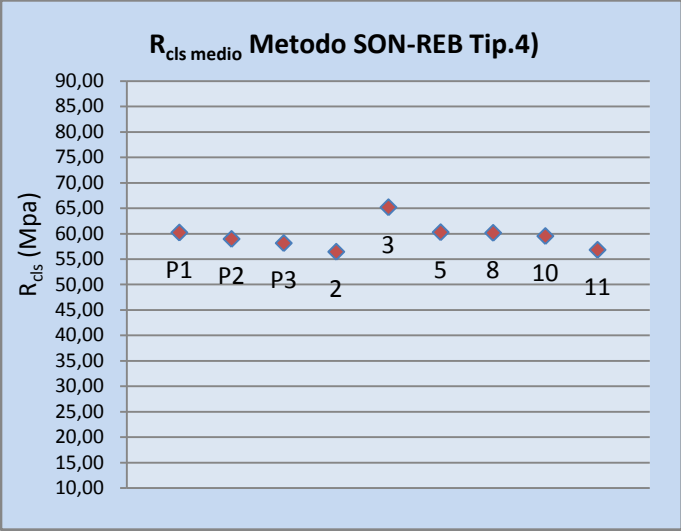
➤ **Tip . 4) II-A-LL 32,5 R + S.F.**

Metodo SON-REB Tip.4)													
-	Prova Ultrasuoni		Prova Sclerometrica										
Sigla n°	Velocità	Velocità media	Indice di Rimbalzo IR per ogni battuta										
	m/s	m/s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	IR Medio	IR Finale
P1	4439.3	4392.2	50	46	49	48.5	47	47.5	47.5	47.5	46	47.67	48.14
P2	4386.1		47.5	48	48.5	47.5	48	48.5	48	46.5	48.5	47.89	
P3	4386.1		47	48	47	48	48	47.5	48	46.5	46.5	47.39	
2	4310.3		46	46	50	50	50	49	48	45	46	47.78	
3	4411.8		52	52	50	52	51	53	48	50	54	51.33	
5	4411.8		49	47	46	49	48	46	50	50	49	48.22	
8	4360.5		48	46	49	52	50	51	50	48	49	49.22	
10	4411.8		48	46	48	50	48	48	48	47	47	47.78	
11	4411.8		46	49	45	44	46	46	46	46	46	46.00	



TARATURA PROCEDIMENTO												
N.	IR medio	prova	ultrasuoni			R _c	R _{cls 1}	R _{cls 2}	R _{cls 3}	α1	α2	α3
			d	ritardo	V1	Cubo	MPa	MPa	MPa	Rc/Rcls1	Rc/Rcls2	Rc/Rcls3
			cm	sec-6	m/sec	MPa						
P1	47.67	diretta	15	33.79	4439.3	60.0	536.6	461.5	495.8	0.112	0.130	0.121
P2	47.89	diretta	15	34.20	4386.1	59.2	523.7	454.0	483.8	0.113	0.130	0.122
P3	47.39	diretta	15	34.20	4386.1	58.2	515.8	448.1	478.4	0.113	0.130	0.122

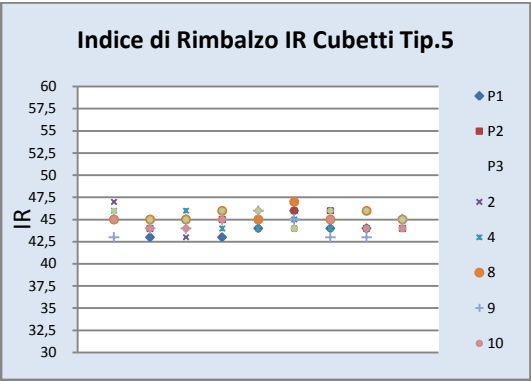
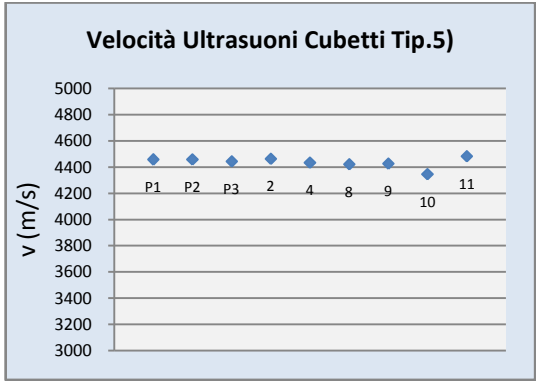
R _{cls} Metodo SON-REB TIP.4) II-A-LL 32,5 R + S.F.				
Sigla n°	R _{cls}	R _{cls}	R _{cls}	R _{cls}
	1	2	3	medio
	MPa	MPa	MPa	MPa
P1	60.39	60.03	60.32	60.25
P2	58.94	59.05	58.86	58.95
P3	58.05	58.29	58.21	58.18
2	56.16	57.01	56.26	56.48
3	66.17	65.09	64.25	65.17
5	60.44	60.21	60.14	60.26
8	60.41	60.45	59.73	60.20
10	59.63	59.52	59.56	59.57
11	56.44	56.77	57.21	56.81
R _{medio}	59.63	59.60	59.39	59.54



La resistenza a compressione del calcestruzzo valutata con il Metodo SON-REB è di **R_{cls} = 59,54 MPa**, con uno scarto del **0,74 %** rispetto alla resistenza cubica ottenuta dalle rotture dei cubetti.

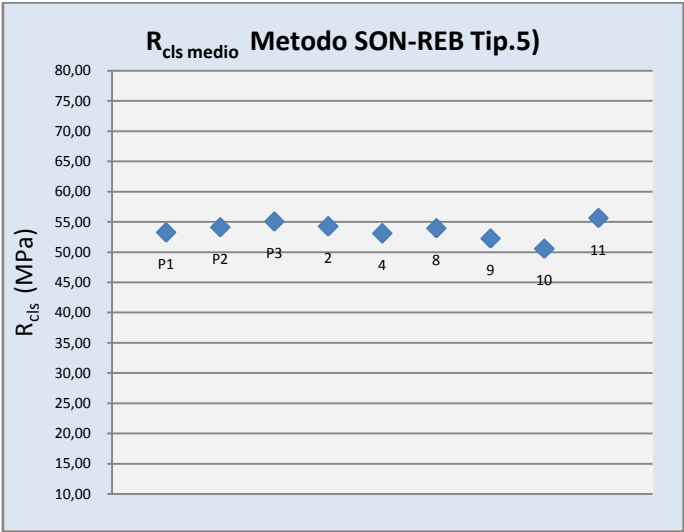
➤ **Tip . 5) II-A-LL 42,5 R**

Metodo SON-REB Tip.5)													
-	Prova Ultrasuoni		Prova Sclerometrica										
Sigla n°	Velocità	Velocità <i>media</i>	<i>Indice di Rimbalzo IR per ogni battuta</i>										
	m/s	m/s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	IR Medio	IR Finale
P1	4457,6	4438.0	45	43	45	43	44	46	44	44	45	44,33	44,91
P2	4458,7		45	44	45	45	45	46	46	44	44	44,89	
P3	4445		45	46	44	47	45	45	47	47	46	45,78	
2	4464		47	45	43	46	44	44	46	44	45	44,89	
4	4434		46	45	46	44	44	45	44	44	44	44,67	
8	4423		45	45	45	46	45	47	45	46	45	45,44	
9	4428		43	44	44	45	46	45	43	43	45	44,22	
10	4347,3		45	44	44	45	46	44	45	44	44	44,56	
11	4484		46	45	45	46	46	44	46	46	45	45,44	



TARATURA PROCEDIMENTO												
N.	IR medio	prova	ultrasuoni			R _c	R _{cls 1}	R _{cls 2}	R _{cls 3}	α1	α2	α3
			d	ritardo	V1	Cubo				Rc/Rcls1	Rc/Rcls2	Rc/Rcls3
			cm	sec-6	m/sec	MPa	MPa	MPa	MPa			
P1	44,3	diretta	15	33,65	4438	52,10	488,3	424,9	463,8	0,107	0,123	0,112
P2	44,9	diretta	15	33,64	4412	56,03	497,5	431,7	470,3	0,113	0,130	0,119
P3	45,8	diretta	15	33,75	4438	54,23	507,8	439,9	476,5	0,107	0,123	0,114

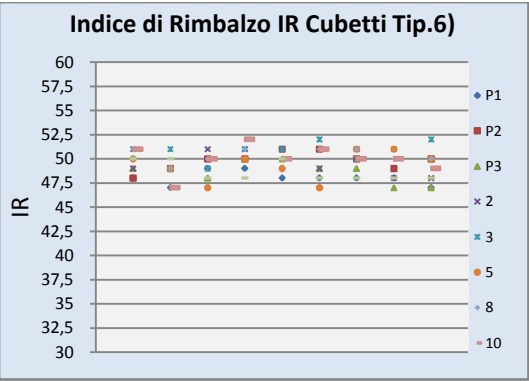
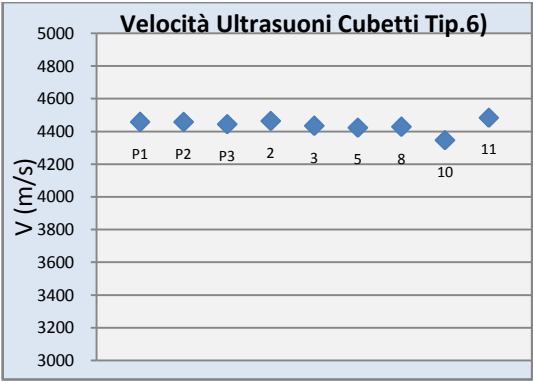
R _{cls} Metodo SON-REB TIP.5) II-A-LL 42,5 R				
Sigla n°	R _{cls}	R _{cls}	R _{cls}	R _{cls}
	1	2	3	medio
	MPa	MPa	MPa	MPa
P1	53,08	53,21	53,38	53,22
P2	54,08	54,06	54,12	54,09
P3	55,20	55,09	54,84	55,04
2	54,25	54,18	54,28	54,24
4	52,93	53,18	53,11	53,07
8	53,92	54,09	53,76	53,93
9	51,98	52,39	52,38	52,25
10	50,12	51,11	50,48	50,57
11	55,86	55,48	55,60	55,65
R _{medio}	53,49	53,64	53,55	53,56



La resistenza a compressione del calcestruzzo valutata con il Metodo SON-REB è di **R_{cls} = 53,56 MPa**, con uno scarto del **1,41 %** rispetto alla resistenza cubica ottenuta dalle rotture dei cubetti.

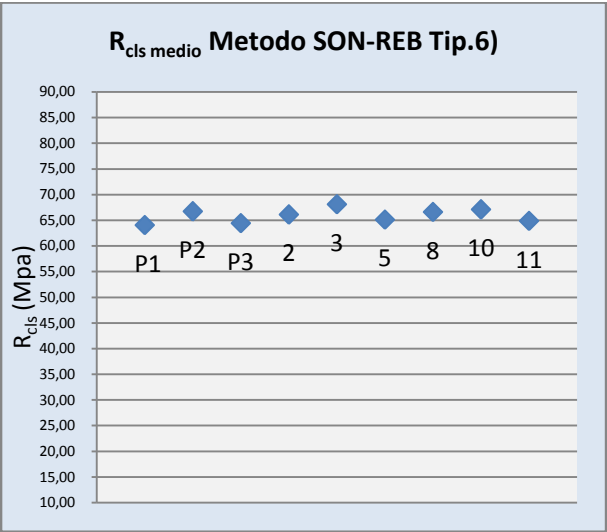
➤ Tip . 6) II-A-LL 42,5 R + S.F.

Metodo SON-REB Tip.6)													
-	Prova Ultrasuoni		Prova Sclerometrica										
Sigla n°	Velocità	Velocità _{media}	Indice di Rimbalzo IR per ogni battuta										
	m/s	m/s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	IR Medio	IR Finale
P1	4475	4456.2	48	47	49	49	48	48	48	48	47	48,00	49,47
P2	4465		48	49	50	50	51	51	50	49	50	49,78	
P3	4452		49	49	48	50	50	49	49	47	47	48,67	
2	4452		49	49	51	51	51	49	51	48	48	49,67	
3	4452		51	51	49	51	51	52	50	51	52	50,89	
5	4440		50	49	47	50	49	47	51	51	50	49,33	
8	4440		50	49	50	51	50	51	51	50	50	50,22	
10	4465		51	47	50	52	50	51	50	50	49	50,00	
11	4465		50	50	48	48	50	48	48	48	48	48,67	



TARATURA PROCEDIMENTO												
N.	IR medio	prova	ultrasuoni			R _c	R _{cls 1}	R _{cls 2}	R _{cls 3}	α1	α2	α3
			d	ritardo	V1	Cubo	MPa	MPa	MPa	Rc/Rcls1	Rc/Rcls2	Rc/Rcls3
			cm	sec-6	m/sec	MPa						
P1	48,00	diretta	15	33,52	4475,0	64,4	553,4	472,5	509,4	0,116	0,136	0,127
P2	49,78	diretta	15	33,59	4465,0	64,4	580,0	492,4	526,5	0,111	0,131	0,122
P3	48,67	diretta	15	33,69	4452,0	66,2	557,1	476,1	510,4	0,119	0,139	0,130

R _{cls} Metodo SON-REB TIP.6) II-A-LL 42,5 R + S.F.				
Sigla n°	R _{cls}	R _{cls}	R _{cls}	R _{cls}
	1	2	3	medio
	MPa	MPa	MPa	MPa
P1	63,90	64,00	64,29	64,06
P2	66,97	66,69	66,45	66,70
P3	64,33	64,49	64,42	64,41
2	66,25	66,14	65,82	66,07
3	68,63	68,18	67,53	68,11
5	65,15	65,26	64,92	65,11
8	66,86	66,73	66,16	66,59
10	67,40	67,06	66,76	67,07
11	64,81	64,84	64,88	64,84
R _{medio}	66,04	65,93	65,69	65,89



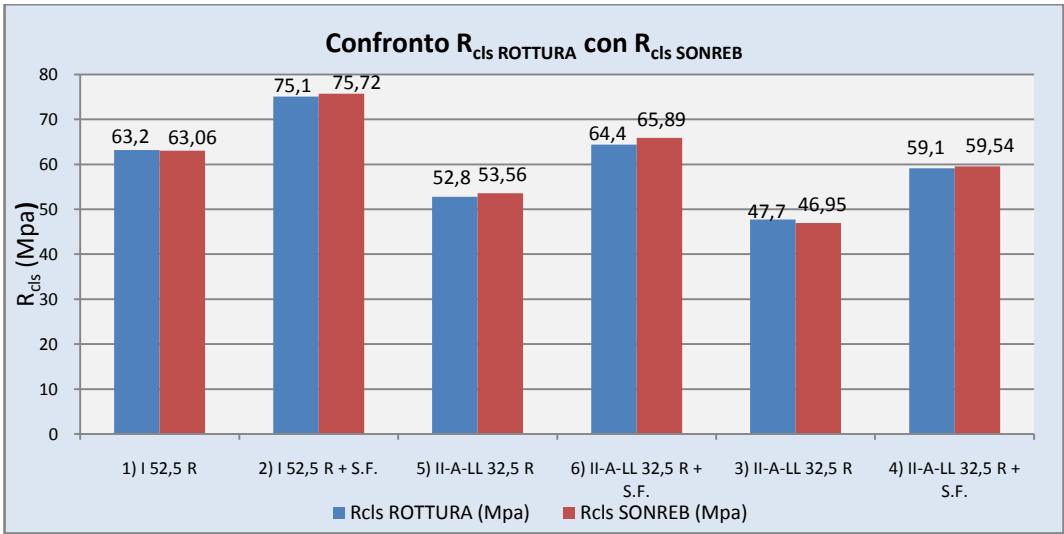
La resistenza a compressione del calcestruzzo valutata con il Metodo SON-REB è di **R_{cls} = 65,89 MPa**, con uno scarto del **2,26 %** rispetto alla resistenza cubica ottenuta dalle rotture dei cubetti.

4.7.2.3. Confronti R_{cls} ROTTURA con la R_{cls} SON-REB

Di seguito si analizza il confronto tra le varie tipologia di mix in termini di: R_{cls} , Velocità Ultrasuoni, IR:

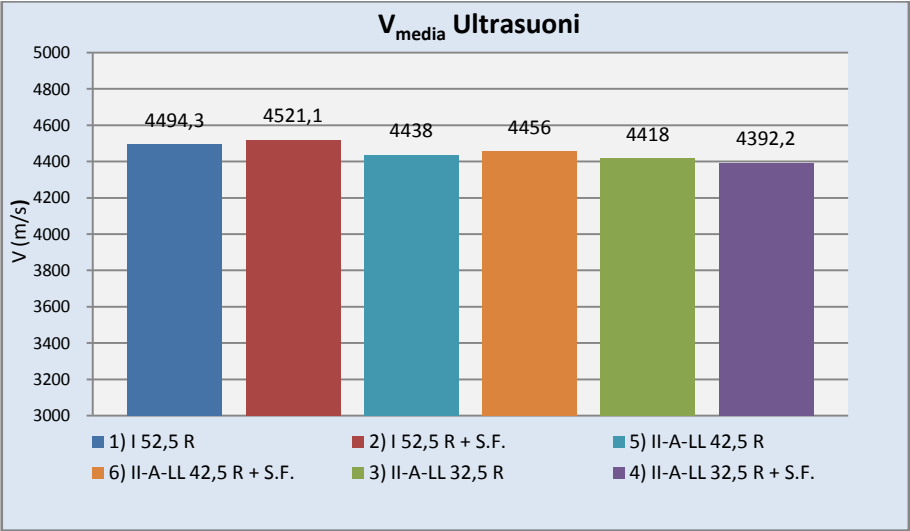
- Confronto R_{cls} ROTTURA con la R_{cls} SON-REB

Tabella: Valori Resistenza Meccanica a Compr.		
Tipologia Mix	R_{cls} ROTTURA (Mpa)	R_{cls} SONREB (Mpa)
1) I 52,5 R	63.2	63.06
2) I 52,5 R + S.F.	75.1	75.72
3) II-A-LL 32,5 R	47.7	46.95
4) II-A-LL 32,5 R + S.F.	59.1	59.54
5) II-A-LL 42,5 R	52,8	53,56
6) II-A-LL 42,5 R + S.F.	64,4	65,89



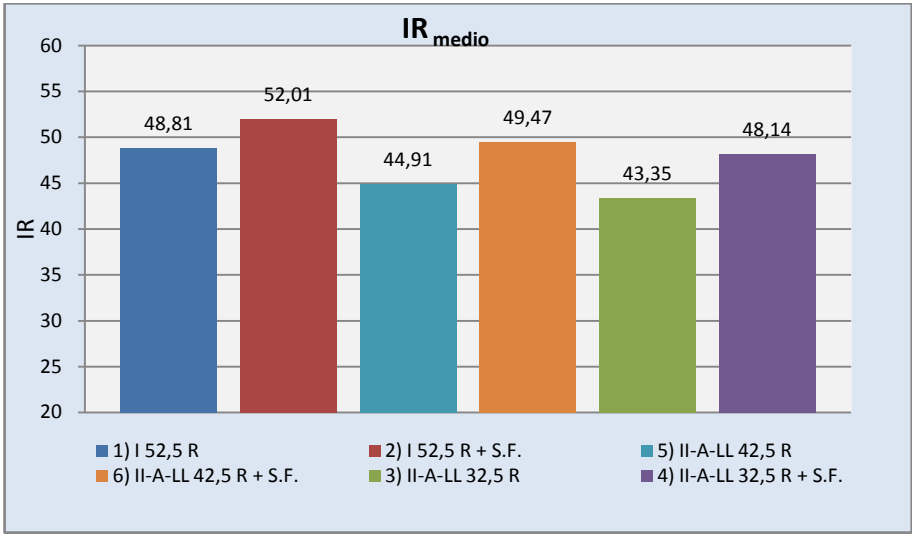
- Velocità Ultrasuoni

Tabella: Valori Velocità medie Ultrasuoni	
Tipologia Mix	V _{media} (m/s)
1) I 52,5 R	4494.3
2) I 52,5 R + S.F.	4521.1
3) II-A-LL 32,5 R	4418.0
4) II-A-LL 32,5 R + S.F.	4392.2
5) II-A-LL 42,5 R	4438.0
6) II-A-LL 42,5 R + S.F.	4456.0



- IR (Indice di Rimbalzo)

Tabella: Valori di IR medio	
Tipologia Mix	IR _{medio}
1) I 52,5 R	48.81
2) I 52,5 R + S.F.	52.01
3) II-A-LL 32,5 R	43.35
4) II-A-LL 32,5 R + S.F.	48.14
5) II-A-LL 42,5 R	43.35
6) II-A-LL 42,5 R + S.F.	48.14



Dalle Tabelle sopra riportate osserviamo come la Resistenza meccanica a compressione, calcolata con il metodo SON-REB si discosta di poco ($\approx 1\%$) rispetto alla resistenza meccanica a compressione di rottura; quest’ultimo aspetto è dovuto principalmente alle ottime capacità di omogeneità del calcestruzzo autocompattante sia in termini di velocità Ultrasonica che per indice di rimbalzo.

La velocità Ultrasonica, per tutti i cubetti delle varie tipologie di mix risulta pressochè identica, quindi funzione solo delle compattezza e non della resistenza meccanica del calcestruzzo.

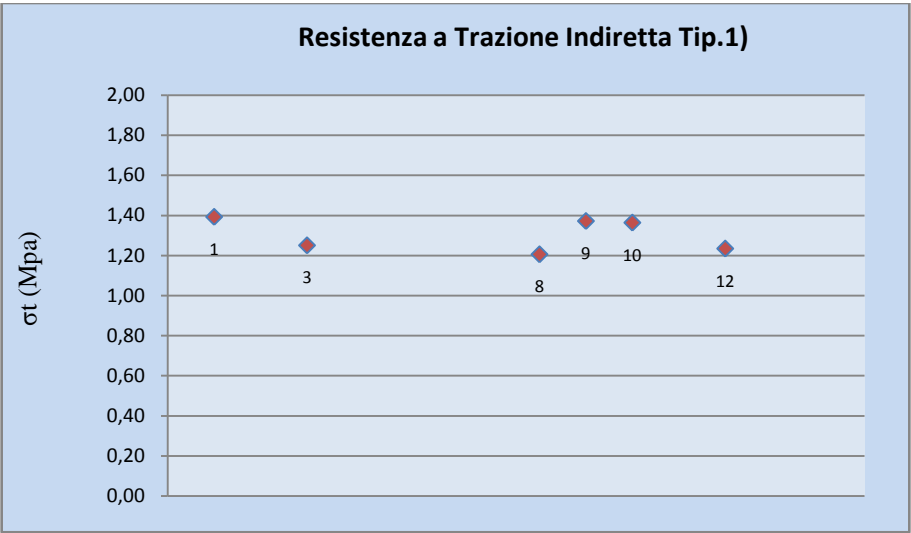
L'indice di Rimbalzo invece, risulta differente per le quattro tipologie di mix, ed è funzione della resistenza meccanica del calcestruzzo; l'incremento dell'indice di Rimbalzo è del **6 %** per la tipologia 1)-2) , del **9 %** per la tipologia 5)-6)ed del **10 %** per la tipologia 3)-4).

4.7.2.4. Resistenza a Trazione Indiretta (Brasiliana) UNI 12390-6 (Distruttiva)

Si riportano di seguito le resistenze meccaniche a trazione indiretta (Brasiliana), per le varie tipologie di mix:

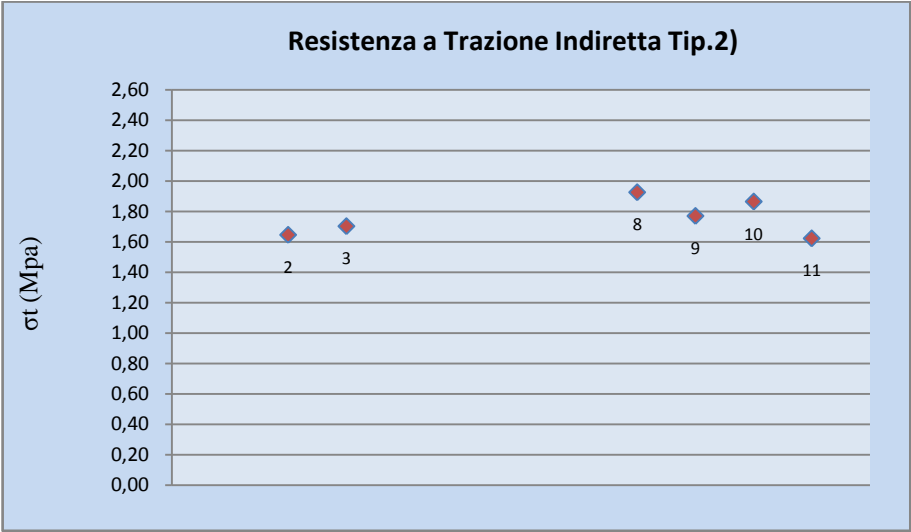
➤ Tip . 1) I 52,5 R

Prove di Resistenza a Trazione Indiretta (Brasiliana)							
Tip.1) I 52,5 R	n° Cub.	Dimensioni (mm)		Area	F rott.	σ_t	$\sigma_{t\text{ media}}$
		L	d	mm ²	KN	Mpa	Mpa
	1	150	150	22500	49.2	1.39	1.303
	3	150	150	22500	44.2	1.25	
	8	150	150	22500	42.6	1.21	
	9	150	150	22500	48.5	1.37	
	10	150	150	22500	48.2	1.36	
	12	150	150	22500	43.6	1.23	



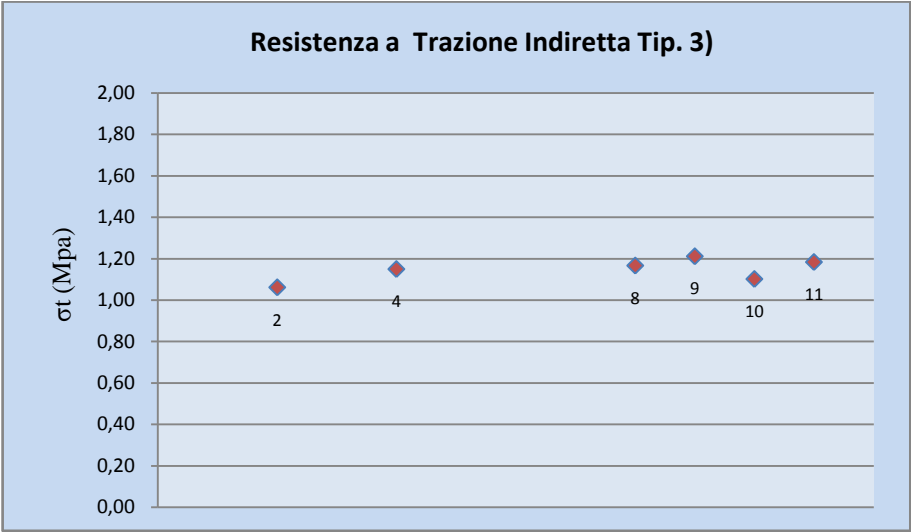
➤ Tip . 2) I 52,5 R + S.F.

Prove di Resistenza a Trazione Indiretta (Brasiliana)							
Tip.2) I 52,5 R + S.F.	n° Cub.	Dimensioni (mm)		Area	F rott.	σ_t	σ_t media
		L	d	mm ²	KN	Mpa	Mpa
	2	150	150	22500	58.2	1.65	1.756
	3	150	150	22500	60.2	1.70	
	8	150	150	22500	68.1	1.93	
	9	150	150	22500	62.6	1.77	
	10	150	150	22500	65.9	1.86	
	11	150	150	22500	57.4	1.62	



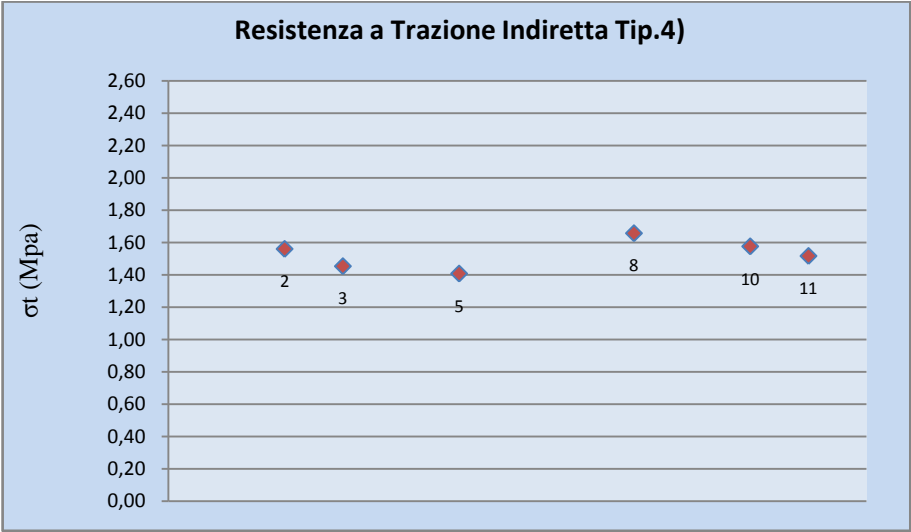
➤ Tip . 3) II-A-LL 32,5 R

Prove di Resistenza a Trazione Indiretta (Brasiliiana)							
Tip.3) II-A-LL 32,5 R	n° Cub.	Dimensioni (mm)		Area	F rott.	σ_t	σ_t media
		L	d	mm ²	KN	Mpa	Mpa
	2	150	150	22500	37.5	1.06	1.145
	4	150	150	22500	40.6	1.15	
	8	150	150	22500	41.2	1.17	
	9	150	150	22500	42.8	1.21	
	10	150	150	22500	38.9	1.10	
	11	150	150	22500	41.8	1.18	



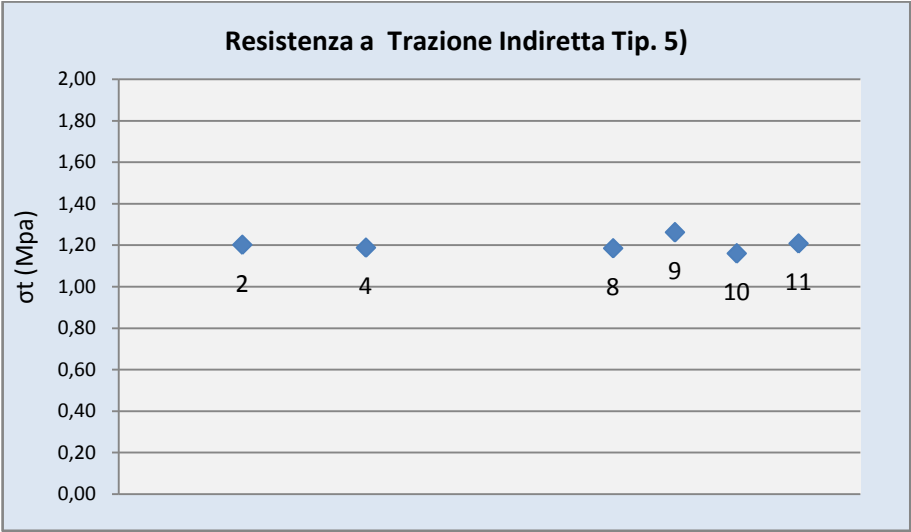
➤ **Tip . 4) II-A-LL 32,5 R + S.F.**

Prove di Resistenza a Trazione Indiretta (Brasiliiana)							
Tip.4) II-A-LL 32,5 R + S.F.	n° Cub.	Dimensioni (mm)		Area	F rott.	σ_t	σ_t media
		L	d	mm ²	KN	Mpa	Mpa
	2	150	150	22500	55.2	1.56	1.529
	3	150	150	22500	51.4	1.45	
	5	150	150	22500	49.8	1.41	
	8	150	150	22500	58.6	1.66	
	10	150	150	22500	55.7	1.58	
	11	150	150	22500	53.6	1.52	



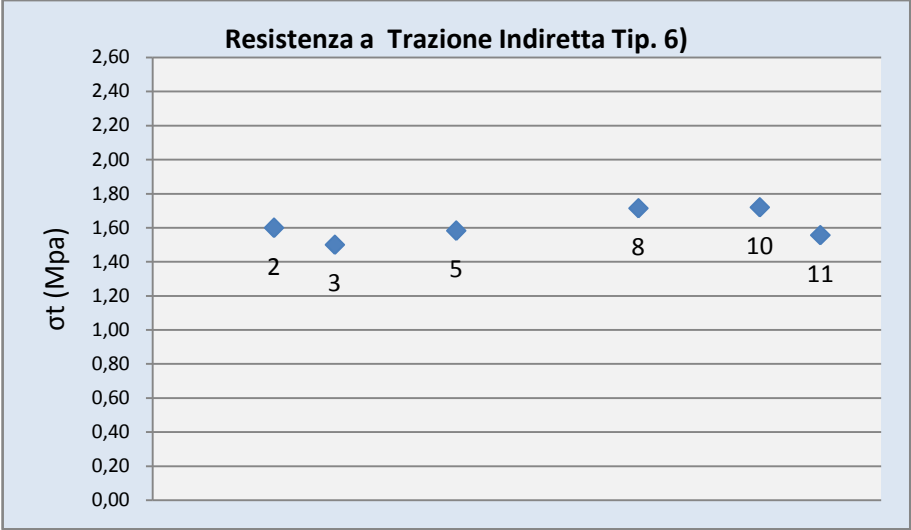
➤ Tip . 5) II-A-LL 42,5 R

Prove di Resistenza a Trazione Indiretta (Brasiliiana)							
Tip.5) II-A-LL 42,5 R	n° Cub.	Dimensioni (mm)		Area	F rott.	σ_t	σ_t media
		L	d	mm ²	KN	Mpa	Mpa
	2	150	150	22500	42,5	1,20	1,201
	4	150	150	22500	42	1,19	
	8	150	150	22500	41,9	1,19	
	9	150	150	22500	44,6	1,26	
	10	150	150	22500	41	1,16	
	11	150	150	22500	42,7	1,21	



➤ Tip . 6) II-A-LL 42,5 R + S.F.

Prove di Resistenza a Trazione Indiretta (Brasiliana)							
Tip. 6) II-A-LL 42,5 R + S.F.	n° Cub.	Dimensioni (mm)		Area	F rott.	σ_t	σ_t media
		L	d	mm ²	KN	Mpa	Mpa
	2	150	150	22500	56,5	1,60	1,612
	3	150	150	22500	53	1,50	
	5	150	150	22500	55,9	1,58	
	8	150	150	22500	60,6	1,71	
	10	150	150	22500	60,8	1,72	
	11	150	150	22500	55	1,56	

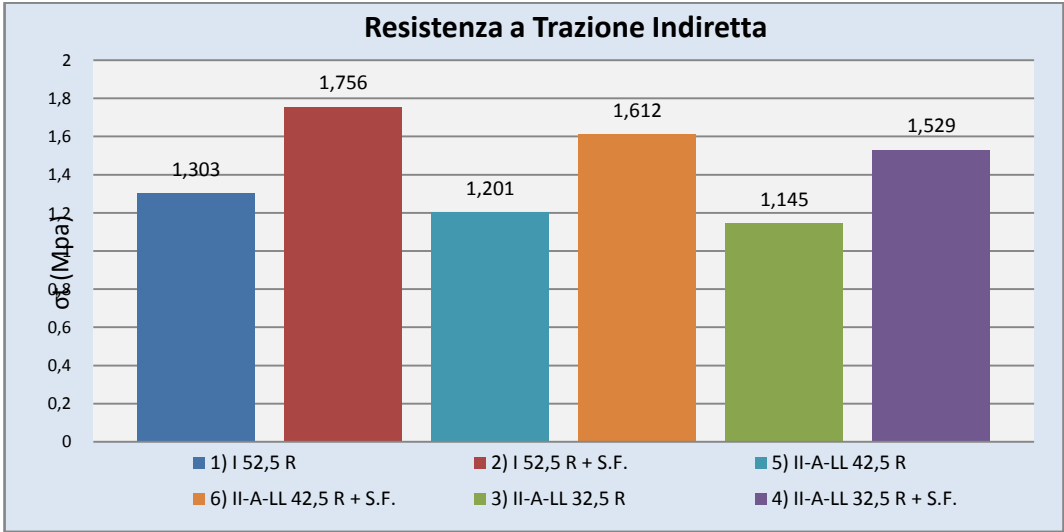


Confronti

Di seguito si analizza il confronto tra le varie tipologia di mix in termini di resistenza a Trazione Indiretta (Brasiliana):

Tabella: Valori Resistenza a Trazione Indiretta

Tipologia Mix	$\sigma_{t\ media}$
1) I 52,5 R	1.303
2) I 52,5 R + S.F.	1.756
3) II-A-LL 32,5 R	1.145
4) II-A-LL 32,5 R + S.F.	1.529
5) II-A-LL 42,5 R	1.201
6) II-A-LL 42,5 R + S.F.	1.612



Dalle Tabelle sopra riportate, si evince come la resistenza a trazione indiretta risulta leggermente maggiore per i mix con aggiunta di fumo di silice. L’incremento di resistenza

a trazione indiretta per i *mix* 2), 4) e 6) è dovuto principalmente: all'aumento di resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo e dall'effetto del fumo di silice.

4.7.2.5. Modulo di Elasticità Secante UNI-EN 12390-13 (ex UNI 6556:1976)

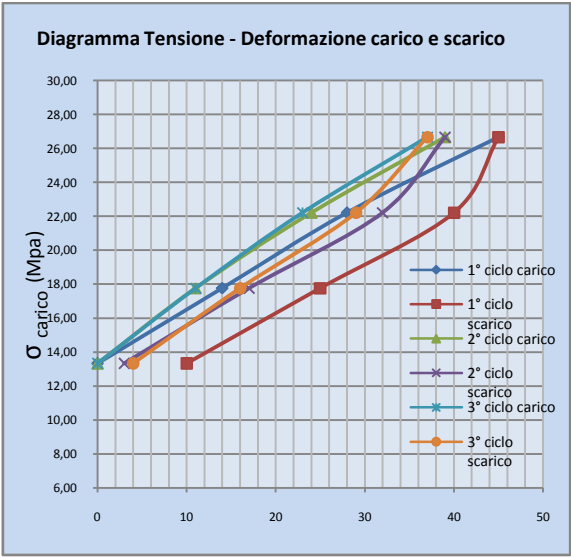
Il modulo di elasticità secante del calcestruzzo secondo le norme tecniche per le costruzioni NTC 08 al paragrafo 11.2.10.3, deve essere determinato su apposite prove stabilite dalla UNI 6556:1976. Si riportano di seguito i valori del modulo elastico secante del calcestruzzo, per le varie tipologie di mix:

➤ Tip . 1) I 52,5 R

- n°8

Tip.1) I 52,5 R n°8						
F _{media rottura} (KN)	Step di Carico F (KN)	Dim.Cubetto			Tensioni di Carico σ (Mpa)	Dist. Estensimetri (mm)
		a (mm)	b (mm)	Area mm²		
1410	600	150	150	22500	26.67	81.00
	500				22.22	
	400				17.78	
	300				13.33	

Tip.1) 52,5 R n°8					
1° carico	1° scarico	2° carico	2° scarico	3° carico	3° scarico
ε _{carico} μ	ε _{scarico} μ	ε _{carico} μ	ε _{scarico} μ	ε _{carico} μ	ε _{scarico} μ
45	45	39	39	37	37
28	40	24	32	23	29
14	25	11	17	11	16
0	10	0	3	0	4
ε'	0.000123	ε'	3.7E-05	ε'	4.94E-05
ε''	0.000432	ε''	0.000444	ε''	0.000407
E (Mpa)	30857.1	E (Mpa)	30000	E (Mpa)	32727.3
E medio (Mpa)	31194.8				



- 1) n°9

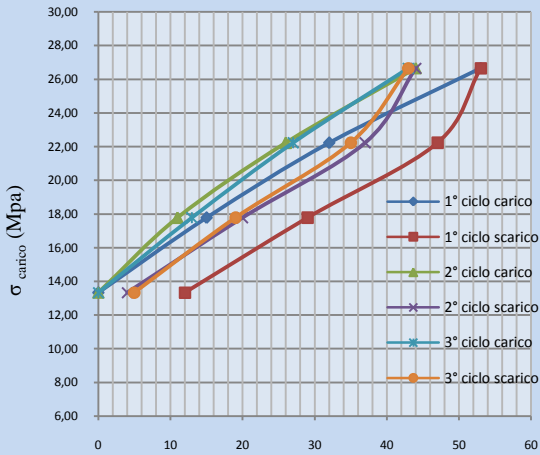
Tip.1) I 52,5 n°9

F _{media rottura} (KN)	Step di Carico F (KN)	Dim.Cubetto			Tensioni di Carico σ (Mpa)	Dist. Estensimetri
		a (mm)	b (mm)	Area mm ²		
1410	600	150	150	22500	26.67	81.00
	500				22.22	
	400				17.78	
	300				13.33	

Tip.1) 52,5 R n°9

1° carico	1° scarico	2° carico	2° scarico	3° carico	3° scarico
<i>ε carico</i>	<i>ε scarico</i>	<i>ε carico</i>	<i>ε scarico</i>	<i>ε carico</i>	<i>ε scarico</i>
μ	μ	μ	μ	μ	μ
53	53	44	44	43	43
32	47	26	37	27	35
15	29	11	20	13	19
0	12	0	4	0	5
<i>ε'</i>	0.000148	<i>ε'</i>	4.94E-05	<i>ε'</i>	6.17E-05
<i>ε''</i>	0.000506	<i>ε''</i>	0.000494	<i>ε''</i>	0.000469
E (Mpa)	26341.5	E (Mpa)	27000	E (Mpa)	28421.1
E medio (Mpa)	27254.2				

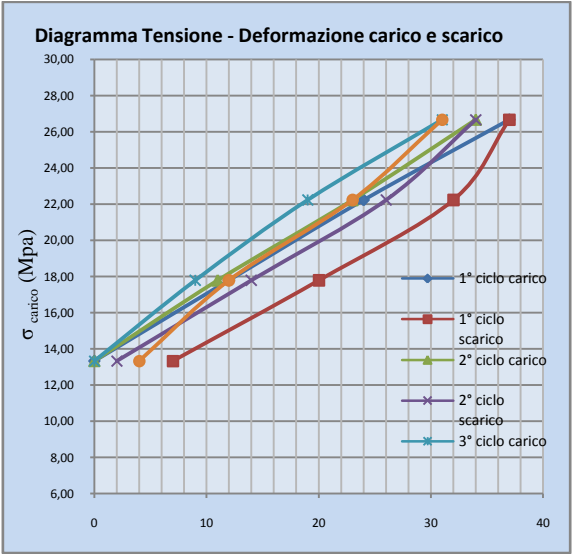
Diagramma Tensione -Deformazione carico e scarico



- 1) n°12

Tip.1) I 52,5 R n°12						
F _{media rottura} (KN)	Step di Carico F (KN)	Dim.Cubetto			Tensioni di Carico σ (Mpa)	Dist.Estensimetri
		a (mm)	b (mm)	Area mm²		
1410	600	150	150	22500	26.67	81.00
	500				22.22	
	400				17.78	
	300				13.33	

Tip.1) 52,5 R n°12					
1° carico	1° scarico	2° carico	2° scarico	3° carico	3° scarico
<i>ε carico</i> μ	<i>ε scarico</i> μ	<i>ε carico</i> μ	<i>ε scarico</i> μ	<i>ε carico</i> μ	<i>ε scarico</i> μ
37	37	34	34	31	31
24	32	23	26	19	23
12	20	11	14	9	12
0	7	0	2	0	4
<i>ε'</i>	8.64E-05	<i>ε'</i>	2.47E-05	<i>ε'</i>	4.94E-05
<i>ε''</i>	0.00037	<i>ε''</i>	0.000395	<i>ε''</i>	0.000333
E (Mpa)	36000.0	E (Mpa)	33750	E (Mpa)	40000.0
E medio (Mpa)	36583.3				



Il modulo di Elasticità secante per la Tipologia di mix 1) è valutato sulla media dei valori dei tre test effettuati sui cubetti:

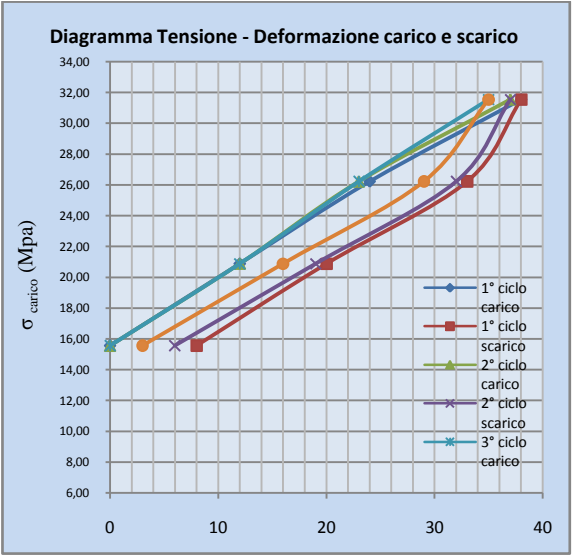
$$E_1) = \frac{31194.87 + 27254.2 + 36583.3}{3} = 31677,4 \text{ Mpa}$$

➤ Tip . 2) I 52,5 R + S.F.

- n°9

Tip.2) 52,5 R + S.F. n°9						
F _{media rottura} (KN)	Step di Carico F (KN)	Dim.Cubetto			Tensioni di Carico σ (Mpa)	Dist. Estensimetri
		a (mm)	b (mm)	Area mm ²		
1590	710	150	150	22500	31.56	82.00
	590				26.22	
	470				20.89	
	350				15.56	

Tip.2) 52,5 R + S.F. n°9					
1° carico	1° scarico	2° carico	2° scarico	3° carico	3° scarico
ϵ_{carico}	$\epsilon_{scarico}$	$\epsilon_{carico} \mu$	$\epsilon_{scarico} \mu$	$\epsilon_{carico} \mu$	$\epsilon_{scarico} \mu$
38	38	37	37	35	35
24	33	23	32	23	29
12	20	12	19	12	16
0	8	0	6	0	3
ϵ'	9.76E-05	ϵ'	7.32E-05	ϵ'	3.66E-05
ϵ''	0.000366	ϵ''	0.000378	ϵ''	0.00039
E (Mpa)	43733.3	E (Mpa)	42322.58	E (Mpa)	41000.0
E medio(Mpa)	42352.0				



- 2) n°10

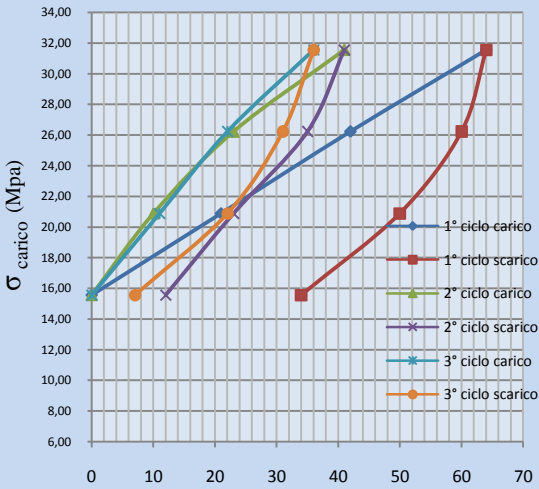
Tip.2) 52,5 R + S.F. n°10

F _{media rottura} (KN)	Step di Carico F (KN)	Dim.Cubetto			Tensioni di Carico σ (Mpa)	Dist. Estensimetri
		a (mm)	b (mm)	Area mm ²		
1590	710	150	150	22500	31.56	82.00
	590				26.22	
	470				20.89	
	350				15.56	

Tip.2) 52,5 R + S.F. n°10

1° carico	1° scarico	2° carico	2° scarico	3° carico	3° scarico
ϵ carico	ϵ scarico	ϵ carico	ϵ scarico	ϵ carico	ϵ scarico
μ	μ	μ	μ	μ	μ
64	64	41	41	36	36
42	60	23	35	22	31
21	50	10	23	11	22
0	34	0	12	0	7
ϵ'	0.000415	ϵ'	0.000146	ϵ'	8.54E-05
ϵ''	0.000366	ϵ''	0.000354	ϵ''	0.000354
E (Mpa)	43733.3	E (Mpa)	45241.38	E (Mpa)	45241.4
E medio(Mpa)	44738.7				

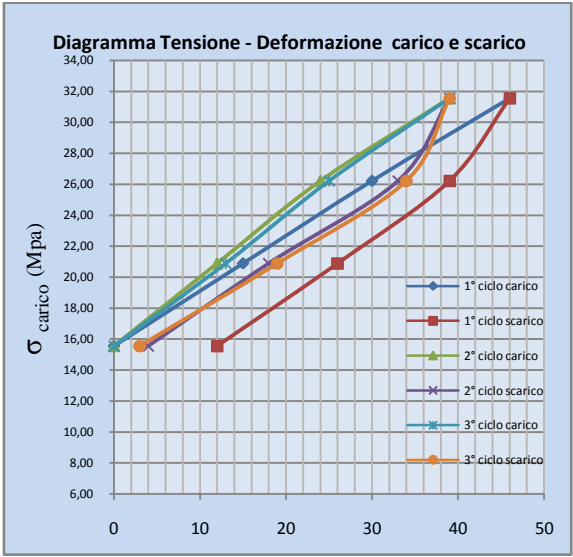
Diagramma Tensione - Deformazione carico e scarico



- 2) n°11

Tip.2) 52,5 R + S.F. n°11						
F _{media rottura} (KN)	Step di Carico F (KN)	Dim.Cubetto			Tensioni di Carico σ (Mpa)	Dist. Estensimentri
		a (mm)	b (mm)	Area mm ²		
1590	710	150	150	22500	31.56	83.00
	590				26.22	
	470				20.89	
	350				15.56	

Tip.2) 52,5 R + S.F. n°11					
1° carico	1° scarico	2° carico	2° scarico	3° carico	3° scarico
ε _{carico}	ε _{scarico}	ε _{carico}	ε _{scarico}	ε _{carico}	ε _{scarico}
μ	μ	μ	μ	μ	μ
46	46	39	39	39	39
30	39	24	33	25	34
15	26	12	18	13	19
0	12	0	4	0	3
ε'	0.000145	ε'	4.82E-05	ε'	3.61E-05
ε''	0.00041	ε''	0.000422	ε''	0.000434
E (Mpa)	39058.8	E (Mpa)	37942.86	E (Mpa)	36888.9
E _{medio} (Mpa)	37963.5				



Il modulo di Elasticità secante per la Tipologia di mix 2) è valutato sulla media dei valori dei tre test effettuati sui cubetti:

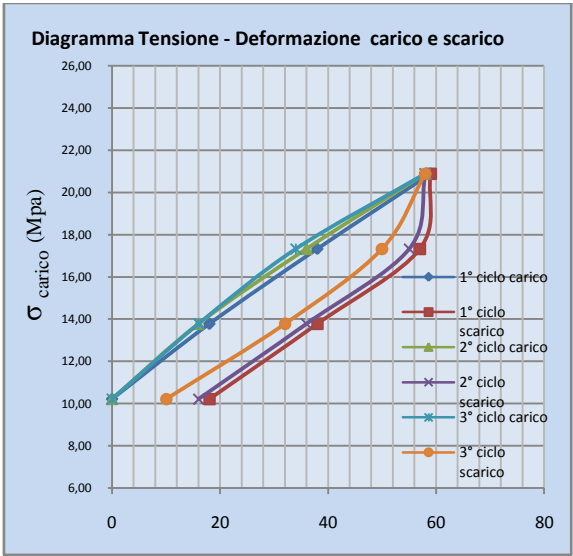
$$E_2) = \frac{42352+44738.7+37963.5}{3} = 41684.7 \text{ Mpa}$$

➤ Tip . 3) II-A-LL 32,5 R

- n°2

Tip.3) II-A-LL 32,5 R n°2						
F _{media rottura} (KN)	Step di Carico F (KN)	Dim.Cubetto			Tensioni di Carico σ (Mpa)	Dist. Estensimentri
		a (mm)	b (mm)	Area mm ²		
1041	470	150	150	22500	20.89	82.00
	390				17.33	
	310				13.78	
	230				10.22	

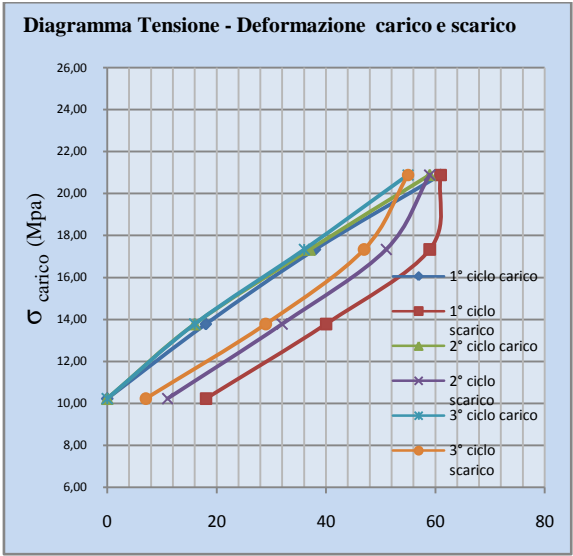
Tip.3) II-A-LL 32,5 R n°2					
1° carico	1° scarico	2° carico	2° scarico	3° carico	3° scarico
ϵ_{carico} μ	$\epsilon_{scarico}$ μ	ϵ_{carico} μ	$\epsilon_{scarico}$ μ	ϵ_{carico} μ	$\epsilon_{scarico}$ μ
136	136	58	58	58	58
49	130	36	55	34	50
22	111	16	36	16	32
0	92	0	16	0	10
ϵ'	0.001122	ϵ'	0.000195	ϵ'	0.000122
ϵ''	0.000537	ϵ''	0.000512	ϵ''	0.000585
E (Mpa)	19878.8	E (Mpa)	20825.4	E (Mpa)	18222.2
E _{medio} (Mpa)	19642.1				



- n°4

Tip.3) II-A-LL 32,5 R n°4						
F _{media rottura} (KN)	Step di Carico F (KN)	Dim.Cubetto			Tensioni di Carico σ (Mpa)	Dist. Estensimetri
		a (mm)	b (mm)	Area mm ²		
1041	470	150	150	22500	20.89	82.00
	390				17.33	
	310				13.78	
	230				10.22	

Tip.3) II-A-LL 32,5 R n°4					
1° carico	1° scarico	2° carico	2° scarico	3° carico	3° scarico
<i>ε carico</i>	<i>ε scarico</i>	<i>ε carico</i>	<i>ε scarico</i>	<i>ε carico</i>	<i>ε scarico</i>
<i>μ</i>	<i>μ</i>	<i>μ</i>	<i>μ</i>	<i>μ</i>	<i>μ</i>
61	61	59	59	55	55
38	59	37	51	36	47
18	40	16	32	16	29
0	18	0	11	0	7
<i>ε'</i>	0.00022	<i>ε'</i>	0.000134	<i>ε'</i>	8.54E-05
<i>ε''</i>	0.000524	<i>ε''</i>	0.000585	<i>ε''</i>	0.000585
E (Mpa)	20341.1	E (Mpa)	18222.22	E (Mpa)	18222.2
E medio(Mpa)	18928.5				

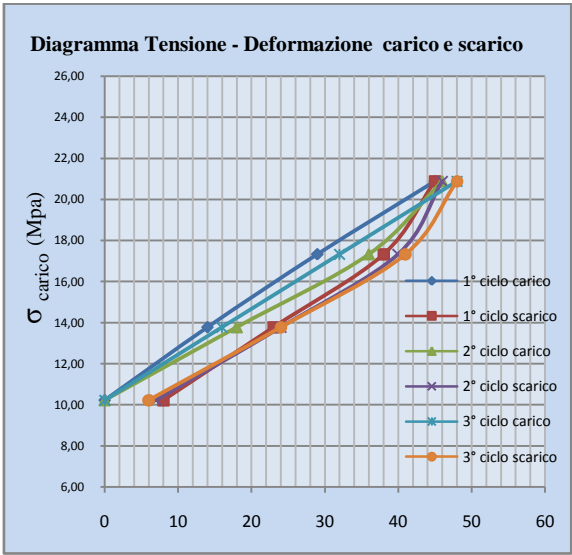


Tip.3) II-A-LL 32,5 R n°11

F _{media rottura} (KN)	Step di Carico F (KN)	Dim.Cubetto			Tensioni di Carico σ (Mpa)	Dist.Estensimentri
		a (mm)	b (mm)	Area mm ²		
1041	470	150	150	22500	20.89	81.00
	390				17.33	
	310				13.78	
	230				10.22	

Tip.3) II-A-LL 32,5 R n°11

1° carico	1° scarico	2° carico	2° scarico	3° carico	3° scarico
ε _{carico}	ε _{scarico}	ε _{carico}	ε _{scarico}	ε _{carico}	ε _{scarico}
μ	μ	μ	μ	μ	μ
45	45	46	46	48	48
29	38	36	40	32	41
14	23	18	24	16	24
0	8	0	7	0	6
ε'	9.88E-05	ε'	8.64E-05	ε'	7.41E-05
ε''	0.000457	ε''	0.000481	ε''	0.000519
E (Mpa)	23351.4	E (Mpa)	22153.85	E (Mpa)	20571.4
E medio(Mpa)	22025.5				



Il modulo di Elasticità secante per la Tipologia di mix 3) è valutato sulla media dei valori dei tre test effettuati sui cubetti:

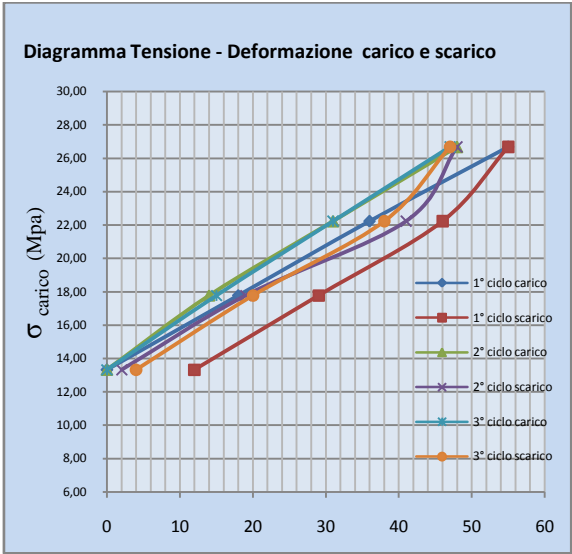
$$E_3) = \frac{19642.1 + 18928.5 + 22025.5}{3} = 20198.7 \text{ Mpa}$$

➤ Tip . 4) II-A-LL 32,5 R + S.F.

- n°3

Tip.4) II-A-LL 32,5 R + S.F. n°3						
F _{media rottura} (KN)	Step di Carico F (KN)	Dim.Cubetto			Tensioni di Carico σ (Mpa)	Dist. Estensimentri
		a (mm)	b (mm)	Area mm ²		
1304	600	150	150	22500	26.67	81.00
	500				22.22	
	400				17.78	
	300				13.33	

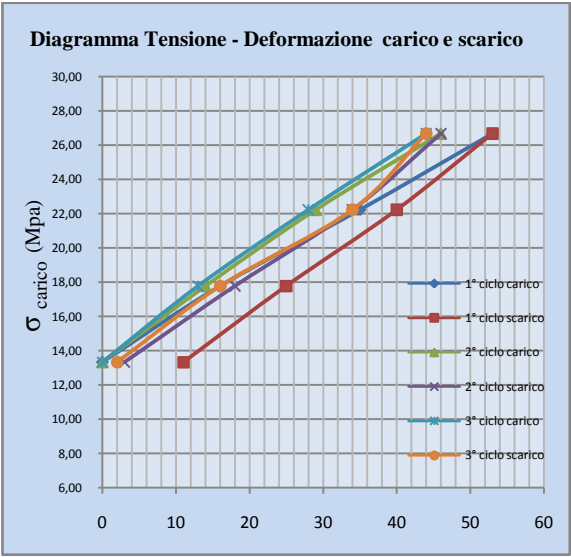
Tip.4) II-A-LL 32,5 R + S.F. n°3					
1° carico	1° scarico	2° carico	2° scarico	3° carico	3° scarico
<i>ε carico</i>	<i>ε scarico</i>	<i>ε carico</i>	<i>ε scarico</i>	<i>ε carico</i>	<i>ε scarico</i>
μ	μ	μ	μ	μ	μ
55	55	48	48	47	47
36	46	31	41	31	38
18	29	14	19	15	20
0	12	0	2	0	4
<i>ε'</i>	0.000148	<i>ε'</i>	2.47E-05	<i>ε'</i>	4.94E-05
<i>ε''</i>	0.000531	<i>ε''</i>	0.000568	<i>ε''</i>	0.000531
E (Mpa)	25116.3	E (Mpa)	23478.26	E (Mpa)	25116.3
E medio(Mpa)	24570.3				



- n°8

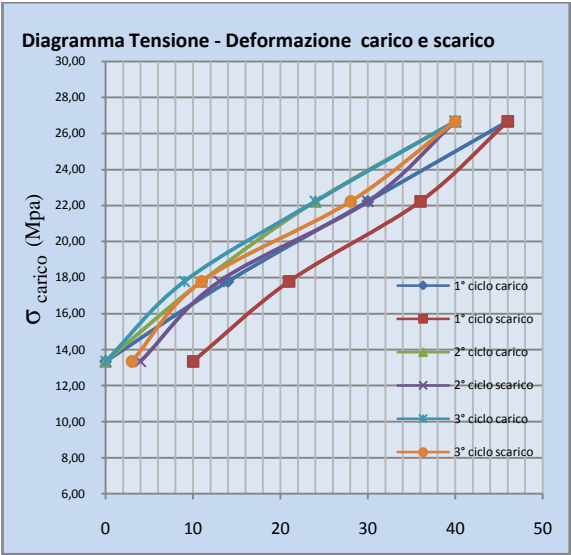
Tip.4) II-A-LL 32,5 R + S.F. n°8						
F _{media rottura} (KN)	Step di Carico F (KN)	Dim.Cubetto			Tensioni di Carico σ (Mpa)	Dist. Estensimetri
		a (mm)	b (mm)	Area mm ²		
1304	600	150	150	22500	26.67	81.00
	500				22.22	
	400				17.78	
	300				13.33	

Tip.4) II-A-LL 32,5 R + S.F. n°8					
1° carico	1° scarico	2° carico	2° scarico	3° carico	3° scarico
ϵ_{carico}	$\epsilon_{scarico}$	ϵ_{carico}	$\epsilon_{scarico}$	ϵ_{carico}	$\epsilon_{scarico}$
μ	μ	μ	μ	μ	μ
53	53	46	46	44	44
35	40	29	34	28	34
16	25	14	18	13	16
0	11	0	3	0	2
ϵ'	0.000136	ϵ'	3.7E-05	ϵ'	2.47E-05
ϵ''	0.000519	ϵ''	0.000531	ϵ''	0.000519
E (Mpa)	25714.3	E (Mpa)	25116.28	E (Mpa)	25714.3
E medio(Mpa)		25515.0			



Tip.4) II-A-LL 32,5 R + S.F. n°11						
F _{media rottura} (KN)	Step di Carico F (KN)	Dim.Cubetto			Tensioni di Carico σ (Mpa)	Dist. Estensimentri
		a (mm)	b (mm)	Area mm ²		
1304	600	150	150	22500	26.67	81.00
	500				22.22	
	400				17.78	
	300				13.33	

Tip.4) II-A-LL 32,5 R + S.F. n°11					
1° carico	1° scarico	2° carico	2° scarico	3° carico	3° scarico
ε _{carico} μ	ε _{scarico} μ	ε _{carico} μ	ε _{scarico} μ	ε _{carico} μ	ε _{scarico} μ
46	46	40	40	40	40
30	36	24	30	24	28
14	21	11	13	9	11
0	10	0	4	0	3
ε'	0.000123	ε'	4.94E-05	ε'	3.7E-05
ε''	0.000444	ε''	0.000444	ε''	0.000457
E (Mpa)	30000.0	E (Mpa)	30000	E (Mpa)	29189.2
E _{medio} (Mpa)	29729.7				



Il modulo di Elasticità secante per la Tipologia di mix 4) è valutato sulla media dei valori dei tre test effettuati sui cubetti:

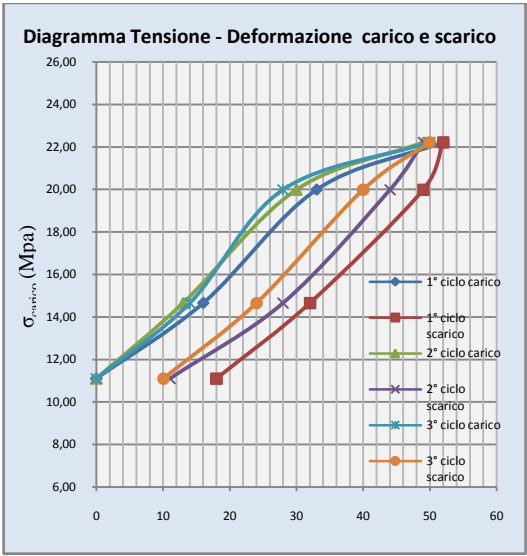
$$E_4) = \frac{24570.2 + 25515.0 + 29729.7}{3} = 26604,96 \text{ Mpa}$$

➤ Tip . 5) II-A-LL 42,5 R

- n°2

Tip.5) II-A-LL 42,5 R n°2						
F _{media rottura} (KN)	Step di Carico F (KN)	Dim.Cubetto			Tensioni di Carico σ (Mpa)	Dist.Estensimetri
		a (mm)	b (mm)	Area mm ²		
1200	500	150	150	22500	22,22	82,00
	450				20,00	
	330				14,67	
	250				11,11	

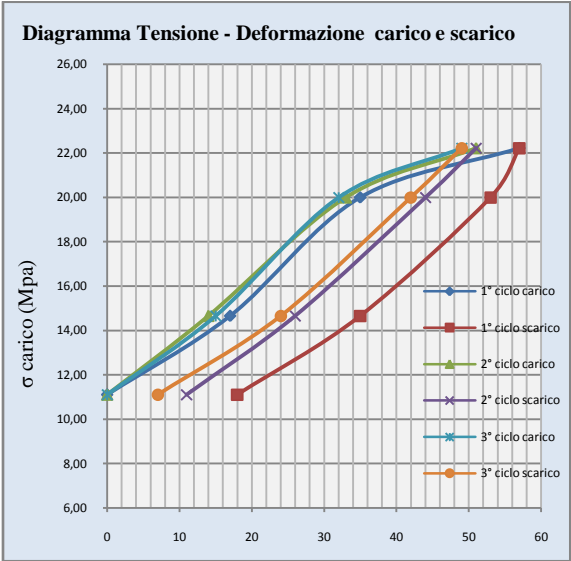
Tip.5) II-A-LL 42,5 R n°2					
1° carico	1° scarico	2° carico	2° scarico	3° carico	3° scarico
ϵ_{carico} μ	$\epsilon_{scarico}$ μ	ϵ_{carico} μ	$\epsilon_{scarico}$ \square	ϵ_{carico} \square	$\epsilon_{scarico}$ \square
52	52	49	49	50	50
33	49	30	44	28	40
16	32	13	28	14	24
0	18	0	11	0	10
ϵ'	0,00022	ϵ'	0,000134	ϵ'	0,000122
ϵ''	0,000415	ϵ''	0,000463	ϵ''	0,000488
E (Mpa)	26797,4	E (Mpa)	23976,61	E (Mpa)	22777,8
E _{medio} (Mpa)	24517,3				



- n°4

Tip.5) II-A-LL 42,5 R n°4						
F _{media rottura} (KN)	Step di Carico F (KN)	Dim.Cubetto			Tensioni di Carico σ (Mpa)	Dist. Estensimetri
		a (mm)	b (mm)	Area mm ²		
1200	500	150	150	22500	22,22	82.00
	450				20,00	
	330				14,67	
	250				11,11	

Tip.5) II-A-LL 42,5 R n°4					
1° carico	1° scarico	2° carico	2° scarico	3° carico	3° scarico
ε _{carico} μ	ε _{scarico} μ	ε _{carico} μ	ε _{scarico} μ	ε _{carico} μ	ε _{scarico} μ
57	57	51	51	49	49
35	53	33	44	32	42
17	35	14	26	15	24
0	18	0	11	0	7
ε'	0,00022	ε'	0,000134	ε'	8,54E-05
ε''	0,000476	ε''	0,000488	ε''	0,000512
E (Mpa)	23361,8	E (Mpa)	22777,78	E (Mpa)	21693,1
E medio(Mpa)	22610,9				



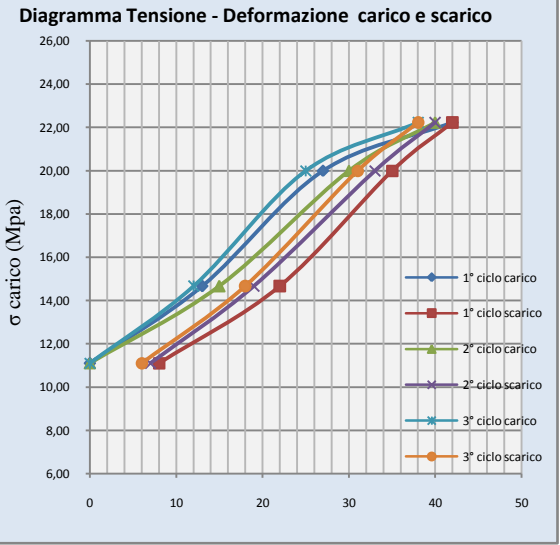
- n°11

Tip.5) II-A-LL 42,5 R n°11

F _{media rottura} (KN)	Step di Carico F (KN)	Dim.Cubetto			Tensioni di Carico σ (Mpa)	Dist. Estensimetri
		a (mm)	b (mm)	Area mm ²		
1200	500	150	150	22500	22,22	82.00
	450				20,00	
	330				14,67	
	250				11,11	

Tip.3) II-A-LL 42,5 R n°11

1° carico	1° scarico	2° carico	2° scarico	3° carico	3° scarico
ε _{carico}	ε _{scarico}	ε _{carico}	ε _{scarico}	ε _{carico}	ε _{scarico}
μ	μ	μ	μ	μ	μ
42	42	40	40	38	38
27	35	30	33	25	31
13	22	15	19	12	18
0	8	0	7	0	6
ε'	9,88E-05	ε'	8,64E-05	ε'	7,41E-05
ε''	0,00042	ε''	0,000407	ε''	0,000395
E (Mpa)	26470,6	E (Mpa)	27272,73	E (Mpa)	28125,0
E medio(Mpa)					
27289,4					



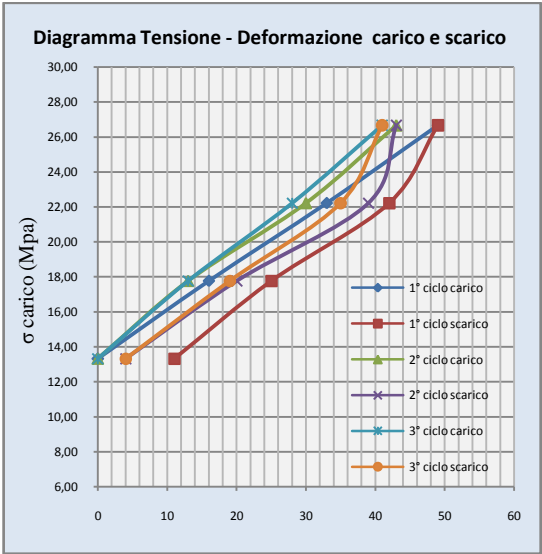
Il modulo di Elasticità secante per la Tipologia di mix 5) è valutato sulla media dei valori dei tre test effettuati sui cubetti:

$$E_5) = \frac{24517.3 + 22610.9 + 27289.4}{3} = 24805.86 \text{ Mpa}$$

- **Tip . 6) II-A-LL 42,5 R + S.F.**
- **n°3**

Tip.6) II-A-LL 42,5 R + S.F. n°3						
F _{media rottura} (KN)	Step di Carico F (KN)	Dim.Cubetto			Tensioni di Carico σ (Mpa)	Dist. Estensimentri
		a (mm)	b (mm)	Area mm²		
1440	600	150	150	22500	26,67	81.00
	500				22,22	
	400				17,78	
	300				13,33	

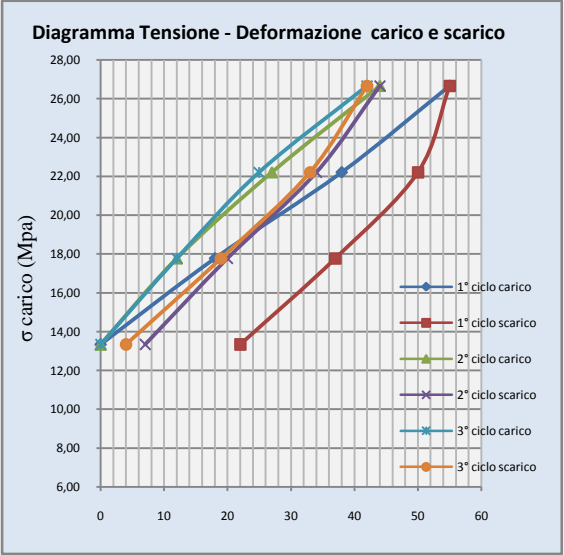
Tip.6) II-A-LL 42,5 R + S.F. n°3					
1° carico	1° scarico	2° carico	2° scarico	3° carico	3° scarico
ϵ carico	ϵ scarico	ϵ carico	ϵ scarico	ϵ carico	ϵ scarico
μ	μ	μ	μ	μ	μ
49	49	43	43	41	41
33	42	30	39	28	35
16	25	13	20	13	19
0	11	0	4	0	4
ϵ'	0,000136	ϵ'	4,94E-05	ϵ'	4,94E-05
ϵ''	0,000469	ϵ''	0,000481	ϵ''	0,000457
E (Mpa)	28421,1	E (Mpa)	27692,31	E (Mpa)	29189,2
E medio(Mpa)	28434.2				



- n°8

Tip.6) II-A-LL 42,5 R + S.F. n°8						
F _{media rottura} (KN)	Step di Carico F (KN)	Dim.Cubetto			Tensioni di Carico σ (Mpa)	Dist. Estensimetri
		a (mm)	b (mm)	Area mm²		
1440	600	150	150	22500	26.67	81.00
	500				22.22	
	400				17.78	
	300				13.33	

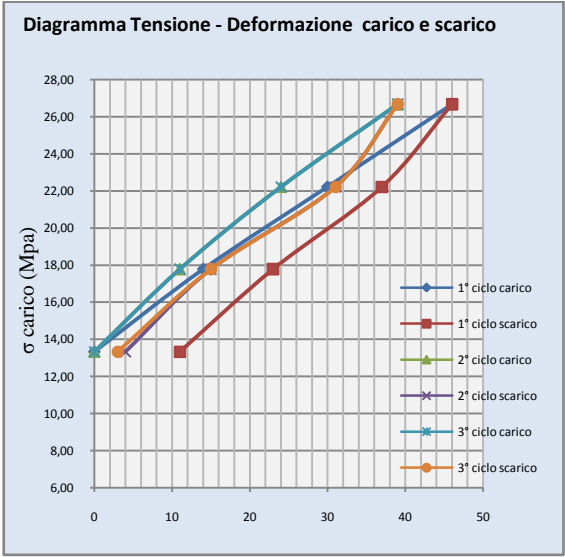
Tip.6) II-A-LL 42,5 R + S.F. n°8					
1° carico	1° scarico	2° carico	2° scarico	3° carico	3° scarico
ε _{carico} μ	ε _{scarico} μ	ε _{carico} μ	ε _{scarico} μ	ε _{carico} μ	ε _{scarico} μ
55	55	44	44	42	42
38	50	27	34	25	33
18	37	12	20	12	19
0	22	0	7	0	4
ε'	0,000272	ε'	8,64E-05	ε'	4,94E-05
ε''	0,000407	ε''	0,000457	ε''	0,000469
E (Mpa)	32727,3	E (Mpa)	29189,19	E (Mpa)	28421,1
E medio(Mpa)					
30112.5					



- n°11

Tip.6) II-A-LL 42,5 R + S.F. n°11						
F _{media rottura} (KN)	Step di Carico F (KN)	Dim.Cubetto			Tensioni di Carico σ (Mpa)	Dist. Estensimentri
		a (mm)	b (mm)	Area mm ²		
1440	600	150	150	22500	26.67	81.00
	500				22.22	
	400				17.78	
	300				13.33	

Tip.6) II-A-LL 42,5 R + S.F. n°11					
1° carico	1° scarico	2° carico	2° scarico	3° carico	3° scarico
ε _{carico} μ	ε _{scarico} μ	ε _{carico} μ	ε _{scarico} μ	ε _{carico} μ	ε _{scarico} μ
46	46	39	39	39	39
30	37	24	31	24	31
14	23	11	15	11	15
0	11	0	4	0	3
ε'	0,000136	ε'	4,94E-05	ε'	3,7E-05
ε''	0,000432	ε''	0,000432	ε''	0,000444
E (Mpa)	30857,1	E (Mpa)	30857,14	E (Mpa)	30000,0
E medio(Mpa)	30571.4				

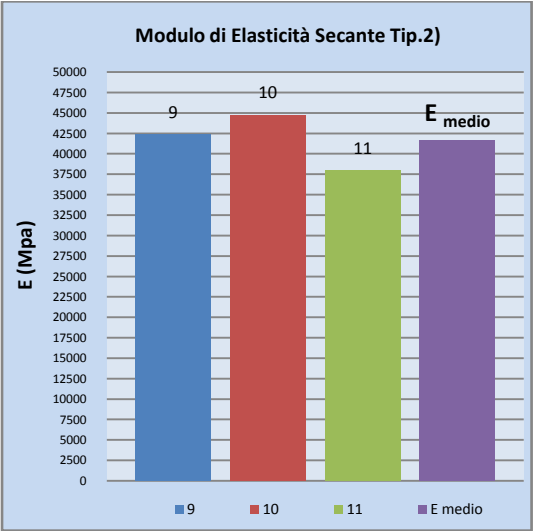
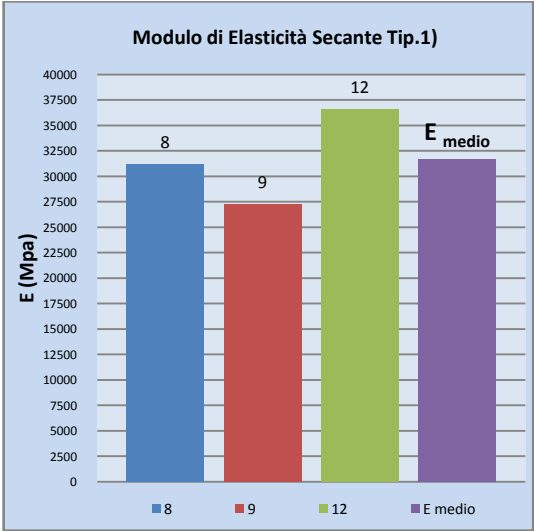


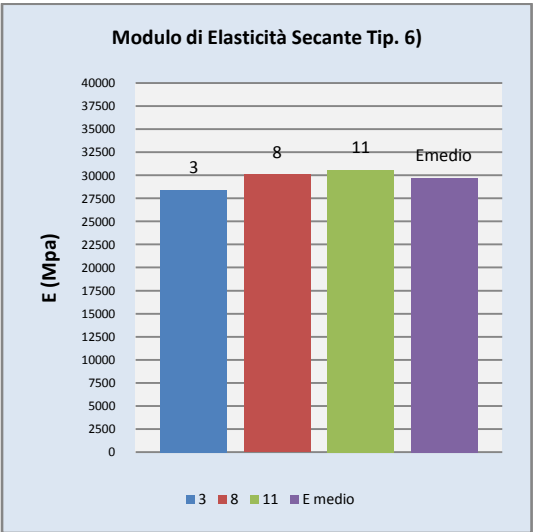
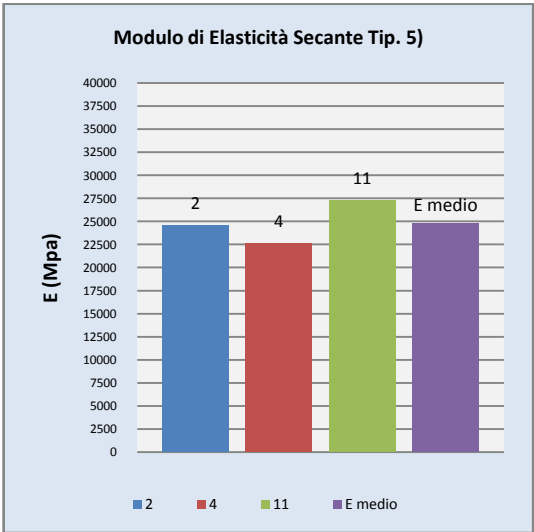
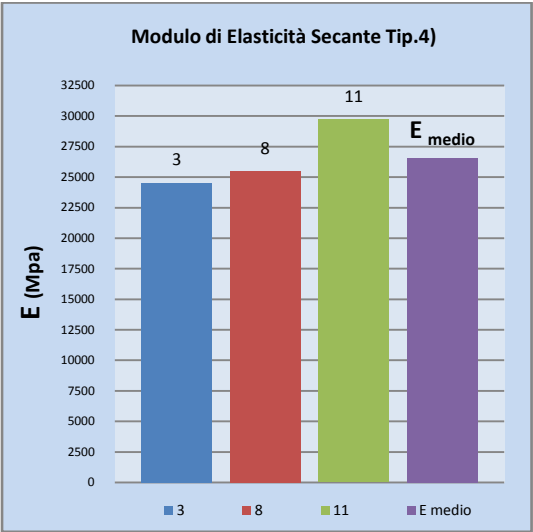
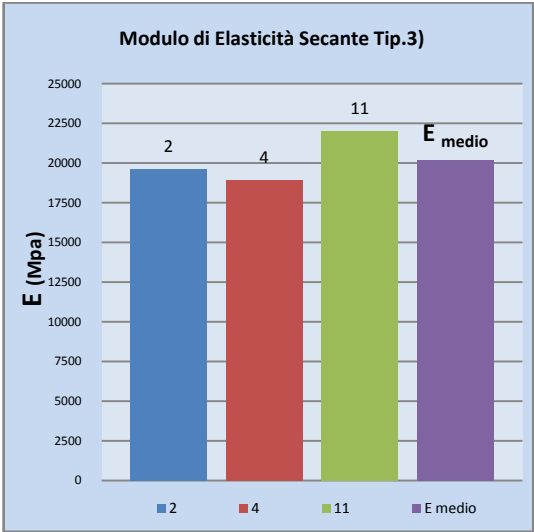
Il modulo di Elasticità secante per la Tipologia di mix 4) è valutato sulla media dei valori dei tre test effettuati sui cubetti:

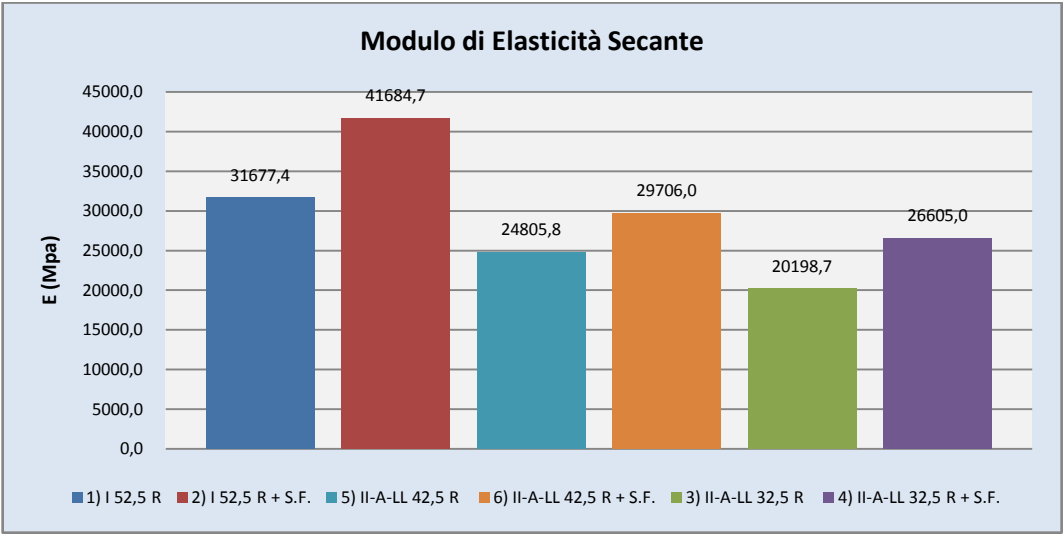
$$E_4) = \frac{28434.2+30112.5+30571.4}{3} = 29706,03 \text{ Mpa}$$

Di seguito si riporta il riepilogo dei moduli di elasticità secante per ogni tipologia di mix:

Tipologia Mix	E _{secante} (Mpa) cubetti n°			E medio
	8	9	12	
1) I 52,5 R	31194.8	27254.2	36583.3	31677.4
	9	10	11	41684.7
2) I 52,5 R + S.F.	42352.0	44738.7	37963.5	
	2	4	11	20198.7
3) II-A-LL 32,5 R	19642.1	18928.5	22025.5	
	3	8	11	26605.0
4) II-A-LL 32,5 R + S.F.	24570.3	25515.0	29729.7	
	2	4	11	24805.87
5) II-A-LL 42,5 R	24517,3	22610,9	27289.4	
	3	8	11	29706.03
6) II-A-LL 42,5 R + S.F.	28434.2	30112.5	30571.4	







Dalle tabelle sopra riportate, si evince come il Modulo di Elasticità Secante risulti maggiore per i mix 2) 4) e 6) con aggiunta di fumo di silice, dell’ordine del **26%**. L’incremento notevole del modulo di Elasticità è dovuto principalmente all’effetto del fumo di silice che irrigidisce eccessivamente la zona d’interfaccia pasta di cemento/aggregato.

4.7.2.6. Modulo di Elasticità Dinamico

Il modulo di elasticità dinamico si determina a partire dalla misurazione della velocità dell'impulso ultrasonico attraverso il materiale, e si calcola con la seguente relazione:

$$E_d = \frac{(1+\delta)*(1-2\delta)}{(1-\delta)} * \frac{\gamma}{g} * V_m^2$$

Dove:

E_d = modulo elastico Dinamico

V_m = velocità ultrasonica (m/s)

δ = Modulo di Poisson = 0,2 per un calcestruzzo non fessurato

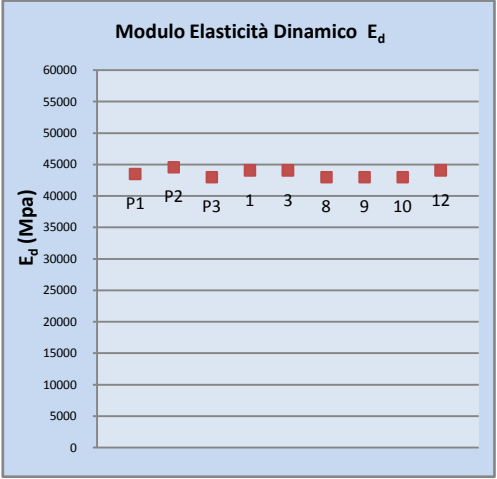
γ = Peso specifico del calcestruzzo (kg/m³)

g = accelerazione di gravità (m/s²)

Si riportano di seguito i valori del modulo elastico dinamico del calcestruzzo, per le varie tipologie di mix:

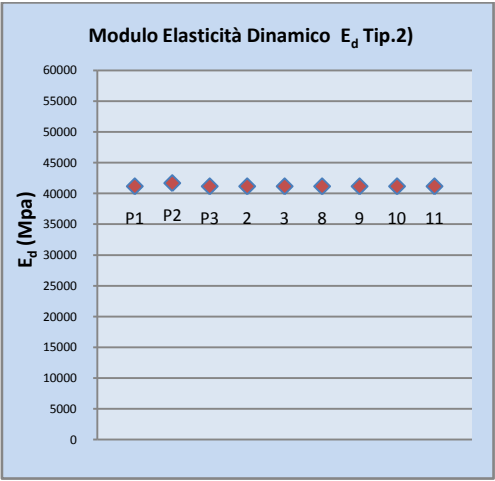
➤ Tip . 1) I 52,5 R

Modulo E _d Tip.1) I 52,5 R					
Sigla n°	Velocità	δ _{poisson}	γ	E _d	E _{d, medio}
	m/s			Mpa	
P1	4491.2	0.2	2397	43511	43574
P2	4545.6			44573	
P3	4464.9			43004	
1	4518.1			44034	
3	4518.1			44034	
8	4464.3			42992	
9	4464.3			42992	
10	4464.3			42992	
12	4518.1			44034	



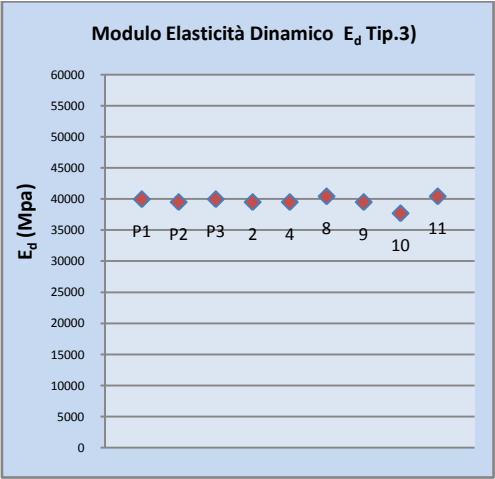
➤ Tip . 2) I 52,5 R + S.F.

Modulo E _d Tip.2) I 52,5 R + S.F.					
Sigla n°	Velocità	δ _{poisson}	γ	E _d	E _{d, medio}
	m/s	-	kg/m ³	Mpa	Mpa
P1	4518.1	0.2	2381	43739	43798
P2	4545.6			44274	
P3	4518.1			43740	
2	4518.1			43739	
3	4518.1			43739	
8	4518.1			43739	
9	4518.1			43739	
10	4518.1			43739	
11	4518.1			43739	



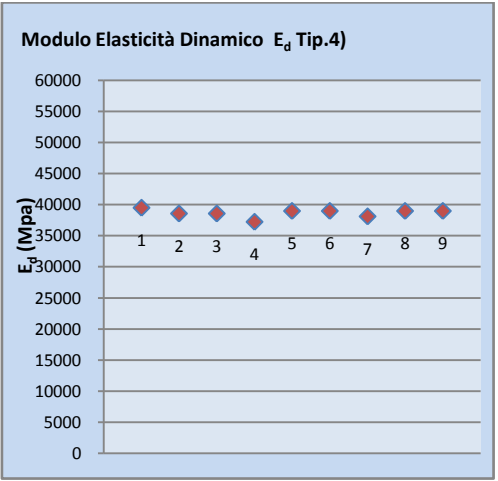
➤ Tip . 3) II-A-LL 32,5 R

Modulo E _d Tip.3) II-A-LL 32,5 R					
Sigla n°	Velocità	δ _{poisson}	γ	E _d	E _{d, medio}
	m/s	-	kg/m ³	Mpa	Mpa
P1	4438.0	0.2	2395	42453	42075
P2	4411.8			41952	
P3	4438.0			42453	
2	4411.8			41952	
4	4411.8			41952	
8	4464.3			42957	
9	4411.8			41952	
10	4310.3			40045	
11	4464.3			42957	



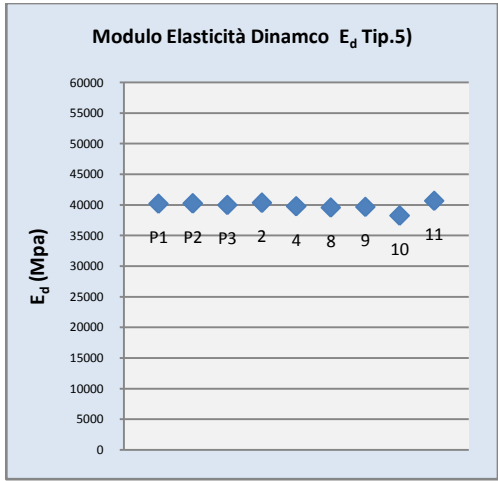
➤ Tip . 4) II-A-LL 32,5 R + S.F.

Modulo E _d Tip.4) II-A-LL 32,5 R + S.F.					
Sigla n°	Velocità	δ _{poisson}	γ	E _d	E _{d, medio}
	m/s	-	kg/m ³	Mpa	Mpa
P1	4439.3	0.2	2365	41951	41068
P2	4386.1			40952	
P3	4386.1			40952	
2	4310.3			39550	
3	4411.8			41433	
5	4411.8			41433	
8	4360.5			40475	
10	4411.8			41433	
11	4411.8			41433	



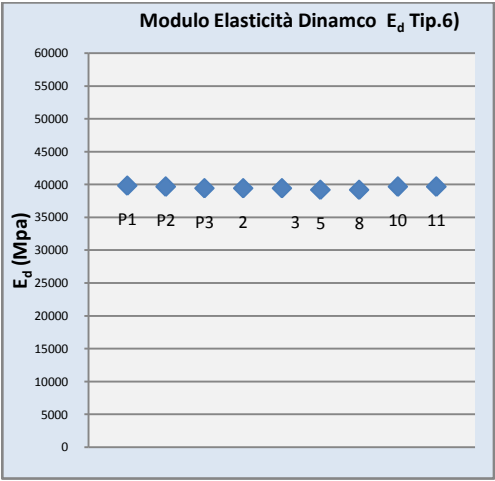
➤ Tip . 5) II-A-LL 42,5 R

Modulo E _d Tip.5) II-A-LL 42,5 R					
Sigla n°	Velocità	δ _{poisson}	γ	E _d	E _{d, medio}
	m/s	-	kg/m ³	Mpa	Mpa
P1	4457,6	0.2	2388	40208	39858
P2	4458,7			40228	
P3	4445,0			39981	
2	4464,0			40324	
4	4434,0			39784	
8	4423,0			39587	
9	4428,0			39676	
10	4347,3			38243	
11	4484,0			40686	



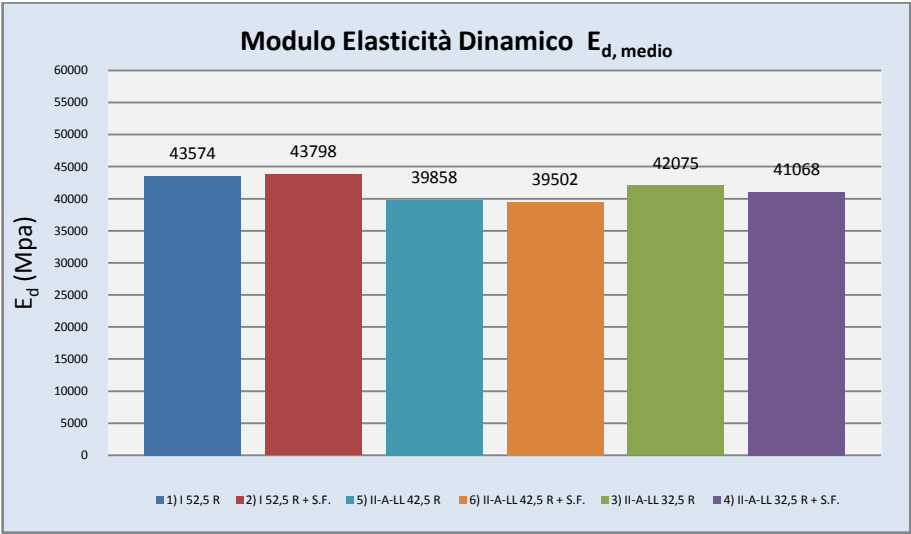
➤ **Tip . 6) II-A-LL 42,5 R + S.F.**

Modulo E _d Tip.4) II-A-LL 42,5 R + S.F.					
Sigla n°	Velocità	δ _{poisson}	γ	E _d	E _{d, medio}
	m/s	-	kg/m ³	Mpa	Mpa
P1	4475,0	0.2	2347	39835	39502
P2	4465,0			39658	
P3	4452,0			39427	
2	4452,0			39427	
3	4452,0			39427	
5	4440,0			39215	
8	4440,0			39215	
10	4465,0			39658	
11	4465,0			39658	



Il modulo di elasticità dinamico per le sei tipologie di mix risulta pressoché costante, questo aspetto è legato principalmente alla compattezza del calcestruzzo autocompattante e non alla resistenza meccanica di quest’ultimo. Di seguito si riporta il modulo di elasticità dinamico medio per le sei tipologie di mix:

Tabella: Valori Modulo Elastico Dinamico	
Tipologia Mix	E _{d, medio} (Mpa)
1) I 52,5 R	43574
2) I 52,5 R + S.F.	43798
3) II-A-LL 32,5 R	42075
4) II-A-LL 32,5 R + S.F.	41068
5) II-A-LL 42,5 R	39858
6) II-A-LL 42,5 R + S.F.	39502



4.7.2.7. Modulo di Elasticità Secante NTC 08 11.2.10.3

Il modulo di elasticità secante E_{cm} previsto dalle norme tecniche delle costruzioni NTC 08 in fase di progettazione, è valutato tra la tensione nulla e quella pari ala 40 % della resistenza meccanica a compressione media (f_{cm}) misurata su provini cilindrici con entrambe le grandezze espresse in Mpa, con la seguente espressione:

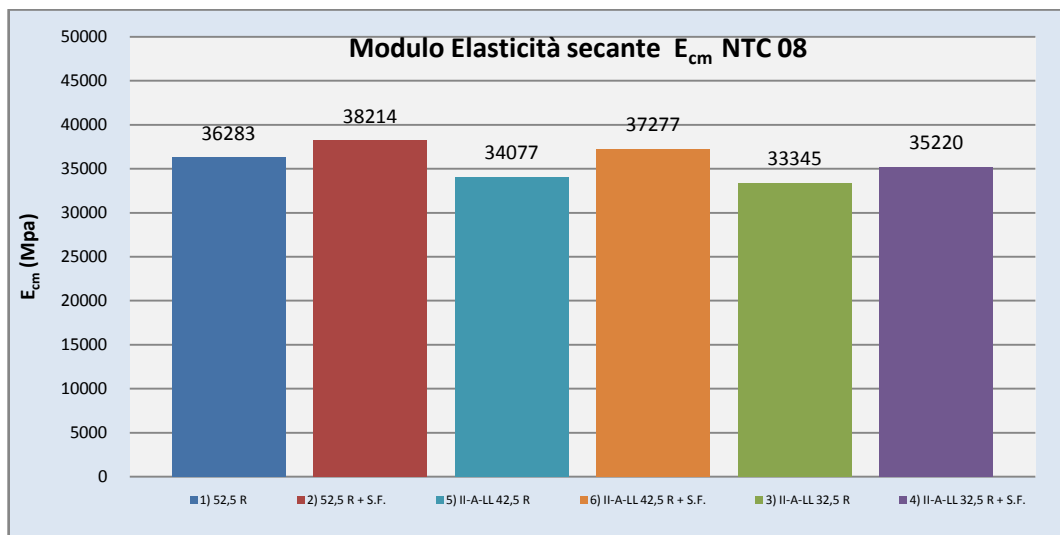
$$E_{cm} = 22000 * \sqrt[3]{\frac{f_{cm}}{10}}$$

con:

$f_{cm} = f_{ck} + 8$ = resistenza media cilindrica a compressione = Mpa

f_{ck} = resistenza caratteristica cilindrica a compressione = Mpa

Tabella: Valori Modulo di Elasticità secante NTC 08				
Tipologia Mix	Classe di Resistenza	f_{ck}	f_{cm}	E_{cm}
	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa
1) 52,5 R	C 45/55	45	53	36283
2) 52,5 R + S.F.	C 55/67	55	63	38214
3) II-A-LL 32,5 R	C 32/40	32	40	33346
4) II-A-LL 32,5 R + S.F.	C 40/50	40	50	35220
5) II-A-LL 32,5 R	C 35/45	35	43	34077
6) II-A-LL 32,5 R + S.F.	C 50/60	50	58	37278



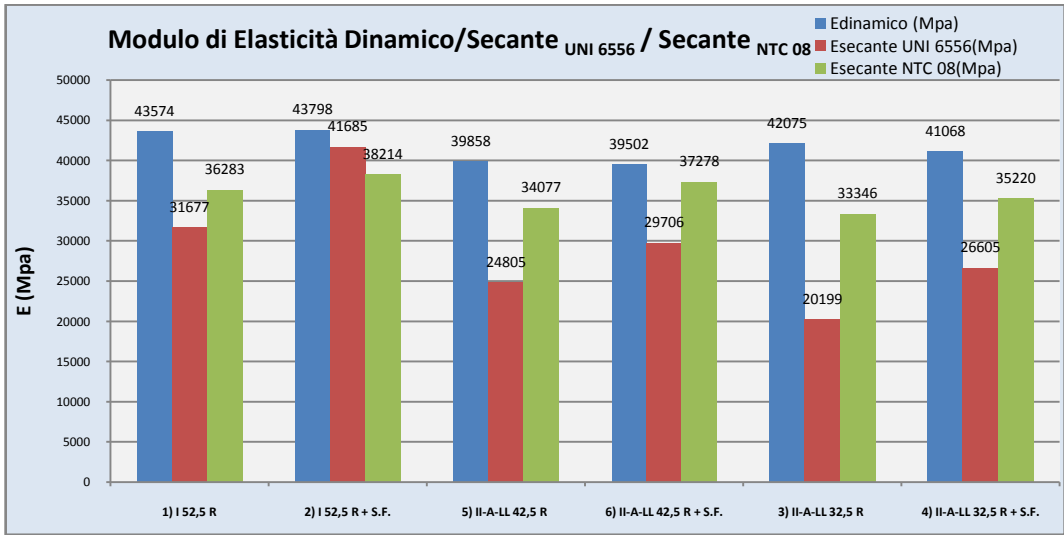
Il modulo di elasticità secante previsto dall'NTC 08 è valutato su un calcestruzzo ordinario, funzione solo della resistenza meccanica del calcestruzzo trascurando la natura dell'inerte (siliceo calcareo) e la composizione del miscuglio di calcestruzzo; il valore del modulo di elasticità di un autocompattante si discosta dal valore di normativa, per il notevole aumento del volume di pasta e di conseguenza un ridotto volume dell' inerte.

A differenza della resistenza a compressione il modulo elastico degli aggregati influenza la rigidità del conglomerato cementizio. La maggior parte degli inerti impiegati per il confezionamento del conglomerato possiede modulo di elasticità compreso tra 40.000-90.000 N/mm², e pertanto, maggiore di quello della pasta di cemento i cui valori si attestano tra 15.000-20.000 N/mm². Il modulo elastico del calcestruzzo è rappresentato dalla media ponderale dei moduli elastici della matrice cementizia e dei granuli lapidei, quindi, aumenta con la rigidità e il volume occupato dagli aggregati nel conglomerato.

4.7.2.8. Confronto Modulo di Elasticità Dinamico, Modulo di Elasticità secante UNI 12390-13 ed Modulo di Elasticità secante NTC 08

Di seguito si riportano le differenze del modulo di elasticità dinamico, il modulo di elasticità secante calcolato manualmente secondo la UNI 6556 ed il modulo di elasticità secondo l’NTC 08, per le varie tipologie di mix:

Tabella: Differenze Modulo Elastico Dinamico/Secante <small>UNI 6556</small> /Secante <small>NTC 08</small>			
Tipologia Mix	E _{dinamico} (Mpa)	E _{secante 12390-13} (Mpa)	E _{NTC 08} (Mpa)
1) I 52,5 R	43574	31677	36283
2) I 52,5 R + S.F.	43798	41685	38214
3) II-A-LL 32,5 R	42075	20199	33346
4) II-A-LL 32,5 R + S.F.	41068	26605	35220
5) II-A-LL 42,5 R	33950	24805	34077
6) II-A-LL 42,5 R + S.F.	29858	29706	37278



Il modulo di elasticità dinamico è superiore sia al modulo di elasticità secante, calcolato manualmente, che al modulo di elasticità secante previsto dall’NTC 08.

4.7.2.9. Profondità di penetrazione all’acqua sotto pressione

La prova di profondità di penetrazione dell’acqua sotto pressione è stata valutata sulla *terna di cubetti* di dimensioni cubiche 150_{mm}, sottoposti ad un getto d’acqua a pressione di 5 bar per 72 ore. Si riportano a seguire i risultati dei test effettuati sui provini per ogni tipologia di mix previsti nella sperimentazione:

Tipologia Mix	Sigla cubetto n°	Penetrazione (mm)	Penetrazione (media)
1) I 52,5 R	1	0	0
	3	0	
	10	0	
2) I 52,5 R + S.F.	2	0	0
	3	0	
	8	0	
3) II-A-LL 32,5 R	8	0	0
	9	0	
	10	0	
4) II-A-LL 32,5 R + S.F.	2	0	0
	5	0	
	10	0	
5) II-A-LL 42,5 R	8	0	0
	9	0	
	10	0	
6) II-A-LL 42,5 R + S.F.	2	0	0
	5	0	
	10	0	

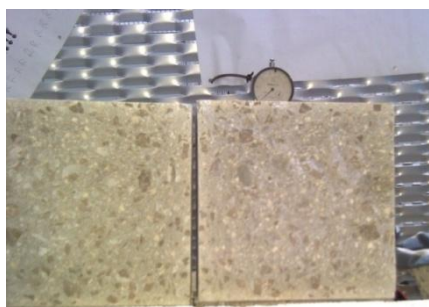
Dalla Tabella sopra riportata si evince come la permeabilità all'acqua di tutti i cubetti sottoposti ai test è risultata nulla, per le tipologie di mix con e senza fumo di silice. I provini spaccati a fine prova, si presentano completamente asciutti:



La penetrazione dell'acqua all'interno dei provini, è stata anche comprovata dal barilotto di acqua graduato (posto in alto all'apparecchiatura) stabile sullo 0. La funzione del barilotto graduato è quella di determinare i grammi d'acqua assorbiti dal cubetto durante la prova, che nel nostro caso non è stato possibile valutare.



La permeabilità all'acqua dei cubetti è stata ulteriormente testata mediante un' *indagine Termografica*, per individuare l'eventuale acqua assorbita non visibile ad occhio nudo; le immagini termografiche effettuate sui alcuni campioni si presentano tutte nel seguente modo:



La zona esterna del cubetto si presenta con un colore blu scuro ad indicare il film d'acqua presente sulla superficie sottoposta a test, viceversa la parte interna è di un colore blu più chiaro ad indicare l'umidità presente nel cubetto.

4.7.2.9.1. Test permeabilità all’acqua calcestruzzo ordinario

La permeabilità all’acqua del calcestruzzo autocompattante, per le quattro tipologie di mix è risultata pari a zero, per tal motivo si è adoperato un confronto con un calcestruzzo ordinario (C25/30, a/c= 0,6). Il risultato del test di permeabilità all’acqua è il seguente:

Tip.Cls Ordinario		
Sigla Cubetto n°	Penetrazione	Penetrazione media
	mm	mm
1	51	50.3
2	42	
3	58	



Un calcestruzzo con un’elevata permeabilità è sinonimo di una scarsa durabilità, poiché con l’acqua penetrano potenziali agenti aggressivi (solfati, cloruri, alcali, ecc) ed inoltre si creano le condizioni di degrado del materiale a causa della formazione di ghiaccio nei climi freddi.

La *permeabilità* del calcestruzzo è strettamente legata alla *porosità* (intesa come una frazione del volume dei vuoti rispetto al volume totale), infatti per i materiali molto porosi e tali che i pori siano tra loro comunicanti, all’aumentare della porosità aumenta anche la permeabilità. Il calcestruzzo è un materiale composito costituito da elementi lapidei (inerti)

generalmente molto meno porosi della matrice (pasta cementizia), pertanto il percolamento d'acqua attraverso il calcestruzzo è governato dalla permeabilità della pasta cementizia. Mentre la porosità e le permeabilità degli elementi lapidei sono costanti nel tempo, la porosità capillare e la permeabilità della pasta cementizia diminuiscono con il progredire dell'idratazione del cemento. Da ciò ne consegue che la permeabilità del calcestruzzo varia con il tempo di stagionatura e più esattamente diminuisce con esso purchè il calcestruzzo sia stagionato in ambiente umido. Per conferire al calcestruzzo un buon grado di porosità, è necessario che quest'ultimo sia ben compattato e quindi privo macroporosità, proprietà presentata in modo ottimale dai calcestruzzi superfluidi ovvero gli SCC. Infine, per ottenere un calcestruzzo a bassa permeabilità è necessario: ridurre la *porosità capillare con un basso rapporto a/c*, *stagionare a umido il calcestruzzo per aumentarne il grado di idratazione*, *confezionare un calcestruzzo che incorpori minor macroporosità (minor aria) e presenti una superficie esterna completamente liscia*.

Il calcestruzzo autocompattante per le quattro tipologie di mix ha garantito ottime capacità di permeabilità all'acqua per effetto delle seguenti caratteristiche: un rapporto $a/c = 0,525$, cubetti stagionati in ambiente umido per 28gg in vasca ad H.R.100% e confezionati con una % di aria dell' $1,3 \div 2,1$ molto più bassa di un calcestruzzo ordinario.

4.7.2.10 Osservazioni proprietà Meccaniche calcestruzzo autocompattante SCC

- La presenza del fumo di silice in aggiunta al cemento, genera una reazione pozzolanica in grado di fornire al calcestruzzo, non solo un aumento di resistenza a compressione ma anche una matrice cementizia molto più fibrosa e compatta. Ai fini del contributo sulla resistenza finale è importante l'effetto densificante o di riempimento ovvero le particelle della microsilice, grazie alle loro ridotte dimensioni, si possono inserire nei vuoti esistenti tra le particelle di cemento, cosicché il prodotto della reazione "*silice amorfa - idrossido di calcio*" (comportamento pozzolanico) può rendere molto compatta la matrice cementizia e quindi meccanicamente più resistente, soprattutto in corrispondenza della zona di interfaccia (*zona di transizione*) tra pasta di cemento e aggregati, riducendone lo

spessore e il grado di orientamento dei cristalli di portlandite (CH) in essa presenti; l'eliminazione o quasi della zona di transizione e l'affinamento dei pori determinano un significativo incremento della resistenza meccanica a compressione e la netta diminuzione della permeabilità.

- L'utilizzo nel calcestruzzo di un cemento di alta qualità (CEM I 52,5) oppure un cemento di miscela di bassa qualità (II-A-LL-32,5 R), ai fini dell'ottimizzazione della % d'incremento delle resistenze meccaniche con aggiunta di fumo di silice appare pressochè la stessa, dell'ordine del 20% .
- La resistenza meccanica a compressione calcolata con il metodo SON-REB, risulta poco differente dalla resistenza meccanica a compressione a rottura (dell'ordine dell'1%), per le ottime capacità di omogeneità del calcestruzzo autocompattante sia in termini di velocità Ultrasonica che per indice di rimbalzo. La velocità Ultrasonica, per tutti i cubetti delle varie tipologie di mix risulta pressochè identica, funzione solo delle compattezza e non della resistenza meccanica del calcestruzzo. L'indice di Rimbalzo invece, risulta differente per le quattro tipologie di mix che è funzione della resistenza meccanica del calcestruzzo.
- L' incremento di resistenza a trazione indiretta per i mix con aggiunta di fumo di silice, è dovuto principalmente all'aumento di resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo e dal rafforzamento della zona d'interfaccia pasta di cemento/aggregato, generato dal fumo di silice;
- Il Modulo di Elasticità secante risulta differente per le sei tipologie di mix, per l' effetto del fumo di silice che irrigidisce eccessivamente la zona d'interfaccia pasta di cemento/aggregato.
- Il Modulo di elasticità dinamico per le sei tipologie di mix risulta pressoché costante, questo aspetto è legato principalmente alla compattezza del calcestruzzo autocompattante e non alla resistenza meccanica di quest'ultimo.
- Il modulo di elasticità secante previsto dall'NTC 08 è valutato su un calcestruzzo ordinario; è funzione solo della resistenza meccanica del calcestruzzo, trascurando la natura dell'inerte (siliceo calcareo) e la composizione del miscuglio di

calcestruzzo; il valore del modulo di elasticità di un autocompattante si discosta dal valore di normativa, per il notevole aumento del volume di pasta e di conseguenza un ridotto volume dell' inerte.

- La permeabilità all'acqua del calcestruzzo autocompattante per i mix, con e senza fumo di silice, è risultata nulla; tale risultato è derivato dall'incremento di resistenza meccanica della pasta cementizia derivante dal minor rapporto a/c, da una corretta stagionatura in ambiente umido dei provini sottoposti ai test, da una superficie estremamente liscia, ed infine da un grado di compattazione elevato, caratterizzato da una minor macroporosità (aria inglobata).

4.8 Conclusioni

L'obiettivo della seguente sperimentazione è quello di valutare l'effetto del fumo di silice sulle caratteristiche reologiche e meccaniche dell'autocompattante per sei tipologie di mix. Tali tipologie si differenziano fra loro solo per il tipo di legante utilizzato nel confezionamento:

Tip.1) cemento Portland I 52,5 R;

Tip.2) cemento Portland I 52,5 R + 11% di fumo di silice;

Tip.3) cemento Portland II-A-LL 32,5 R;

Tip.4) cemento Portland II-A-32,5 R + 11% di fumo di silice;

Tip.5) cemento Portland II-A-LL 42,5 R;

Tip.6) cemento Portland II-A-42,5 R + 11% di fumo di silice.

Sulla base dei risultati ottenuti dai test allo stato fresco ed allo stato indurito sul calcestruzzo autocompattante per le sei tipologie di mix, si è condotta un'analisi per stimare gli effetti del fumo di silice in aggiunta al mix design:

4.8.1. Effetti del fumo di silice sulle proprietà *reologiche* dell'autocompattante SCC

- Il calcestruzzo autocompattante con aggiunta di fumo di silice, risulta maggiormente *viscoso* con una conseguente riduzione della *fluidità* e della *mobilità in spazi ristretti* (es. armature); tale viscosità si può ridurre aumentando il rapporto $\frac{a}{finissimo}$;
- Miglioramento del fenomeno di Segregazione e Bleeding, per l'elevata finezza del fumo di silice;
- Richiesta di maggior acqua d'impasto, compensata dall'utilizzo dei additivi superfluidificanti per evitare l'alterazione del rapporto *a/c*, ma soprattutto per disperdere efficacemente le micro particelle di fumo di silice fra i granuli di cemento;
- L'aria inglobata nella fase di confezionamento è maggiore a causa dell'utilizzo eccessivo di additivi superfluidificanti e del fatto che il calcestruzzo essendo più viscoso trova maggior difficoltà ad espellere l'aria inglobata;
- La massa volumica del calcestruzzo risulta leggermente inferiore, per il ridotto peso specifico del fumo di silice $\approx 2,2 \text{ kg/l}$;
- L'incremento di viscosità, la diminuzione del bleeding e del fenomeno della segregazione e la maggior richiesta d'acqua, è motivata dal fatto che quest'ultimo ha una **Superficie specifica** elevatissima pari a $20\div 30 \text{ m}^2/\text{g}$ ($200 \div 300 * 10^3 \text{ cm}^2/\text{g}$ *al Blaine*) maggiore rispetto ad un *Cemento Portland* di $0,2\div 0,5 \text{ m}^2/\text{g}$ ($2000\div 5000 \text{ cm}^2/\text{g}$ *al Blaine*);

4.8.2. Effetti del fumo di silice sulle proprietà *meccaniche* dell'autocompattante SCC

- Con un dosaggio massimo del fumo di silice all'11% sul cemento, si ha un incremento della **resistenza meccanica a compressione** dell'ordine del **16-20 %**, con un miglioramento per la classe di cemento di miscela al Calcare (II-A-LL); l'utilizzo della classe di cemento è subordinata al valore di R_{ck} che si deve conseguire;

- L'incremento della **resistenza a trazione indiretta** per i mix con aggiunta di fumo di silice è dell'ordine del **25%** ;
- L'Incremento del **Modulo di Elasticità secante** è dell'ordine del **24%**, per l'effetto densificante del fumo di silice che irrigidisce notevolmente la zona d'interfaccia pasta di cemento/aggregato;
- L'incremento d'**aria inglobata** nei mix con aggiunta di fumo di silice è dell'ordine del **30 %**, determinando un modesto accrescimento delle macroporosità allo stato indurito, visibili anche ad occhio nudo;
- Notevole riduzione della dimensione dei pori capillari e densificazione della matrice cementizia: le micro particelle grazie alla loro struttura amorfa riempiono i vuoti interstiziali tra i granuli di cemento, sviluppando un sistema compatto e addensato e lasciando a disposizione dell'acqua un volume molto piccolo;
- Reazione con la calce libera, creando gel di C-S-H maggiormente resistente, per l'effetto pozzolanico del fumo di silice, a causa della sua maggior finezza e dell'elevato contenuto di silice amorfa;
- Miglioramento della zona di interfaccia (*zona di transizione*) tra pasta di cemento e aggregati, riducendone lo spessore e il grado di orientamento dei cristalli di portlandite (CH) in essa presenti; l'eliminazione o quasi della zona di transizione e l'affinamento dei pori determinano un significativo incremento della resistenza meccanica a compressione e la netta diminuzione della permeabilità.
- diminuzione drastica dell'essudamento dell'acqua (bleeding) anche interno;
- La **permeabilità** del calcestruzzo autocompattante è risultata nulla per le sei tipologie di mix, per cui non è stato possibile valutarne l'eventuale efficacia del fumo di silice, in quanto già di per sé il calcestruzzo autocompattante ha offerto ottime capacità di resistenza alla penetrazione all'acqua;

4.8.3. Analisi dei Costi Tipologie mix

Di seguito si riportano il costo di mercato per le sei tipologie di mix:

- **Tip.1)**, corrispondente ad una classe del calcestruzzo di **C 45/55** è di **81,00 €/m³**
- **Tip.2)**, corrispondente ad una classe del calcestruzzo di **C 55/67** è di **93,00 €/m³**
- **Tip.3)**, corrispondente ad una classe del calcestruzzo di **C 32/40** è di **77,00 €/m³**
- **Tip.4)**, corrispondente ad una classe del calcestruzzo di **C 40/50** è di **88,00 €/m³**
- **Tip.5)**, corrispondente ad una classe del calcestruzzo di **C 35/45** è di **79,00 €/m³**
- **Tip.6)**, corrispondente ad una classe del calcestruzzo di **C 50/60** è di **91,00 €/m³**
-

Da ciò ricaviamo che il costo del calcestruzzo con aggiunta di fumo di silice dosato all'11% sul cemento per la **Tip.2), Tip.4) e Tip.6)**, risulta maggiore di circa **13%** rispetto ai mix senza aggiunta (Tip.1, 3 e 5); l'elevato costo del fumo di silice e quindi del calcestruzzo, è dovuto sia alla sua ridotta disponibilità in commercio ma anche per l'elevatissime caratteristiche pozzolaniche che offre; per questo motivo il fumo di silice viene utilizzato in centrale di betonaggio solo in casi eccezionali per la produzione di calcestruzzi speciali allorquando si richiede una elevata impermeabilità oppure si vogliono produrre impasti ad alta ed altissima resistenza meccanica a compressione.

Il vantaggio economico di realizzare un'opera con un calcestruzzo autocompattante con aggiunta Tipo II è notevole, infatti di esso fa aumentare il costo del calcestruzzo del 13 % in più rispetto ad uno senz'aggiunte, ma il costo dell'opera non aumenta più dell'1%. Tuttavia i costi di restauro per un'opera in calcestruzzo non durabile possono raggiungere fino al 125 volte il costo originale della stessa quando il degrado è così avanzato da rendere la stessa inseribile per le originali funzioni.

4.8.4. Sviluppi Futuri

Per approfondire il comportamento del fumo di silice in aggiunta al calcestruzzo autocompattante, è necessario sottoporre le tipologie di mix impiegate nella seguente sperimentazione, ad ulteriori test di:

- Aggressione *chimica* (carbonatazione, solfati, cloruri, alcali, ecc);
- Aggressione *fisica* (comportamento al fuoco, gelo e disgelo);
- Aggressione *meccanica* (urti e abrasioni);
- *Ritiro plastico*

Bibliografia:

- Renato Iovino, Flavia Fascia ; **“La struttura in cemento armato per l’architettura”**; Aracne (2008).
- M.Collepari; **“Il nuovo Calcestruzzo”** ; Ed.4 Tintoretto (2006).
- M.Collepari, J.J. Ogoumah Olagot, F. Simonelli, R.Troli; **“Il Calcestruzzo Vulnerabile”**; Ed 1 Tintoretto (2005).
- M.Collepari, S. Collepari, R. Troli; **“ Mix Design del Calcestruzzo”**; Ed.1 Tintoretto (2008).
- L.Coppola; **“ Concretum”**; McGraw-Hill (2007).
- L.Coppola; **“ Manuale del calcestruzzo di qualità”**; Il sole 24 ore (2008)
- Norme tecniche delle Costruzioni (D.M. 14/01/2008).
- Circolare del 02/02/2009 n°617. Istruzione per l’applicazione delle nuove norme tecniche delle Costruzioni del 14/01/2008.
- Linee guida per la prescrizione delle opere in cemento armato **“PROGETTO CONCRETE”**
- UNI-EN 206-1 Calcestruzzo. Specificazione, prestazione, produzione e conformità.
- UNI 11040:2003 Calcestruzzo autocompattante - Specifiche, caratteristiche e controlli.
- UNI 11044:2003 Prova sul calcestruzzo autocompattante fresco - Determinazione dello scorrimento confinato mediante scatola ad U.
- UNI-EN 11104 Calcestruzzo. Specificazione, prestazione, produzione e conformità. Istruzioni complementari per l’applicazione della EN 206.
- UNI-EN 197-1 Cemento. Parte 1: Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni.
- UNI-EN 12620 Aggregati per calcestruzzo.
- UNI-EN 934-2 Additivi per calcestruzzo.
- UNI-EN 1008 Acqua di impasto.
- UNI-EN 450 Ceneri volanti per calcestruzzo.

- UNI-EN 13263 parte 1 e 2. Fumi di silice per calcestruzzo.
- UNI-EN 12350-2 Prova di Abbassamento al cono di Abrams - Slump test.
- UNI-EN 12350-6 Massa Volumica del calcestruzzo fresco.
- UNI-EN 12350-7 Determinazione del contenuto di aria nell'impasto.
- UNI-EN 12350-8 Calcestruzzo autocompattante - Prova di spandimento e del tempo di spandimento.
- UNI-EN 12350-9 Calcestruzzo autocompattante - Prova del tempo di efflusso.
- UNI-EN 12350-10 Calcestruzzo autocompattante - Prova di scorrimento confinato mediante scatola ad L.
- UNI-EN 12350-12 Calcestruzzo autocompattante - Prova di scorrimento confinato mediante anello a J.
- UNI-EN 12390-1 Prove su calcestruzzo indurito. Forma, dimensioni ed altri requisiti per provini e per casseforme.
- UNI-EN 12390-2 Confezione e stagionatura dei provini per prove di resistenza.
- UNI-EN 12390-3 Prova su calcestruzzo indurito. Resistenza alla compressione dei provini.
- UNI-EN 12390-4 Prova su calcestruzzo indurito. Resistenza alla compressione. Specifiche per macchina di prova.
- UNI-EN 12390-6 Prova su calcestruzzo indurito. Resistenza a Trazione indiretta dei provini.
- UNI-EN 12390-7 Prova su calcestruzzo indurito. Determinazione della massa volumica allo stato indurito.
- UNI-EN 12390-8 Profondità di penetrazione dell'acqua sotto pressione.
- UNI-EN 12390-13 (ex UNI 6556:1976) Prova sul calcestruzzo indurito - Parte 13: Determinazione del modulo di elasticità secante in compressione.
- UNI-EN 12504-2 Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Prove non distruttive - Determinazione dell'indice sclerometrico.

Bibliografia

- UNI-EN 12504-4 Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici.

Si ringrazia per la collaborazione logistica tecnica e strumentale :



C.M.C. s.r.l.

Impianto produzione conglomerati cementizi e bituminosi

Via Scafati, 44 – 80050 Santa Maria la Carità (Na)